



Вестник

**Донского
государственного
технического
университета**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
И НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

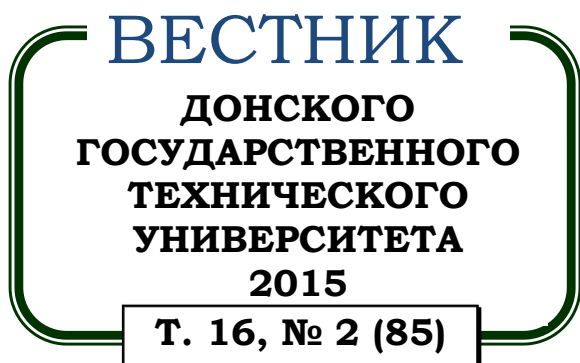
Vestnik of Don State Technical University

Том **16**
№2 (85)
2016

ISSN 1992-5980
DOI 10.12737/issn.1992-5980

- 1 **Механика**
Mechanics
- 2 **Машиностроение и машиноведение**
Machine Building and Machine Science
- 3 **Информатика, вычислительная техника и управление**
Information Technology, Computer Science, and Management
- 4 **Процессы и машины агроинженерных систем**
Processes and Machines of Agro-Engineering Systems
- 5 **Безопасность деятельности человека**
Safety of Human Activity

vestnik.donstu.ru



Теоретический
и научно-практический журнал

Включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25.07.2014 г. №793 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03.06.2015 г. №560

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Издаётся с 1999 г.

Главный редактор — председатель Редакционного совета Б. Ч. Месхи

Редакционный совет:

Выходит 4 раза в год
апрель-июнь 2016 г.

Торстен Бертрам (Германия), И. Вернер (Израиль), Лару К. Гиллеспи (США),
О. В. Дворников (Беларусь), Г. Г. Матишов (Россия), В.И. Минкин (Россия),
Нгуен Донг Ань (Вьетнам), И. Б. Севостьянов (США), Юха Контио (Финляндия).

Редакционная коллегия:

зам. главного редактора — А. И. Сухинов
зам. главного редактора — В. П. Димитров
ответственный редактор — М. Г. Комахидзе
ответственный секретарь — Е. В. Петрова

Механика:

ведущий редактор по направлению - А. Н. Соловьёв
Редколлегия направления: С. М. Айзикович,
В. Л. Заковоротный, И. Я. Никифоров, Д. А. Пожарский

Машиностроение и машиноведение:

ведущий редактор по направлению - В. В. Илясов
Редколлегия направления: А. П. Бабичев, Г. И. Бровер,
М. Е. Попов, А. А. Рыжкин, М. А. Тамаркин, М. П. Шишкарёв

Информатика, вычислительная техника и управление:

ведущий редактор по направлению - Р. А. Нейдорф
Редколлегия направления: Д. А. Безуглов, А. К. Тугенгольд

Процессы и машины агроинженерных систем:

ведущий редактор по направлению - В. И. Пахомов
Редколлегия направления: Ю. И. Ермольев, И. А. Хозяев

Безопасность деятельности человека:

ведущий редактор по направлению - А. Н. Чукарин
Редколлегия направления: Ю. И. Булыгин

Над номером работали: И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)

Подписано в печать 29.06.2016., дата выхода в свет 30.06.2016.

Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.

Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 1/7 Цена свободная.

Адрес редакции:

344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес издателя:

344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

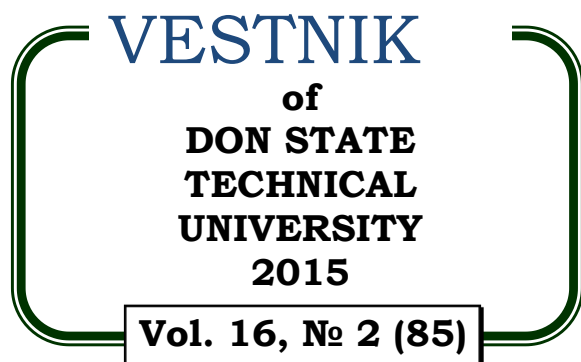
Адрес полиграфического предприятия:

344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.

<http://science.donstu.ru>

*Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано
Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций*

© Донской государственный технический университет, 2016



Theoretical
and scientific-practical journal

Recommended by the State
Commission for Academic Degrees and Titles
for publications of the thesis research results
for Doctor's and Candidate Degree (the solution
of the Presidium of the State Commission
for Academic Degrees and Titles
of the Russian Education and Science Ministry,
February 19, 2010, № 6/6)

Founded in 1999

4 issues a year
April- June 2016

Founder and publisher — Don State Technical University

Editor-in-Chief — Editorial Board Chairman Besarion C. Meskhi

Editorial Board:

Nguyen Dong Ahn (Vietnam), Torsten Bertram (Germany), Oleg Dvornikov (Belarus),

LaRoux K. Gillespie (USA), Juha Kontio (Finland), Gennady Matishov (RF),

Vladimir Minkin (RF), Igor Sevostianov (USA), Igor Verner (Israel).

deputy chief editor — Alexander A. Sukhinov

deputy chief editor — Valery P. Dimitrov

executive editor — Manana G. Komakhidze

executive secretary — Elena V. Petrova

Mechanics:

managing editor - Arkady N. Solovyev

Editorial Board: Dmitry A. Pozharskiy,

Igor Y. Nikiforov, Sergey M. Aizikovich, Vilor L. Zakovorotny

Machine Building and Machine Science:

managing editor - Victor V. Ilyasov

Editorial Board: Anatoly A. Ryzhkin, Anatoly P. Babichev,

Galina I. Brover, Mikhail A. Tamarkin, Mikhail E. Popov, Mikhail P. Shishkarev

Information Technology, Computer Science, and Management:

managing editor – Rudolf A. Neydorf

Editorial Board: Andrey K. Tugengold, Dmitry A. Bezuglov

Processes and Machines of Agro-Engineering Systems:

managing editor - Victor I. Pakhomov

Editorial Board: Igor A. Khozyayev, Yury I. Yermolyev

Safety of Human Activity:

managing editor - Alexander N. Chukarin

Editorial Board: Yury I. Bulygin

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)

Passed for printing 29.06.2016, imprint date 30.06.2016.

Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.

C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 1/7. Free price.

Editorial Board's address:

Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.

Publisher's address:

Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.

Printery address:

Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.

<http://science.donstu.ru>

Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-66004 of 06.06.2016. issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА

- Соловьёв А. Н., Шевцов М. Ю.* Реконструкция дефектов в упругих телах сочетанием генетического алгоритма и метода конечных элементов 5
- Евельсон Л. И., Памфилов Е. А., Цыганков А. Г., Ширяева Л. И.* Исследование с помощью компьютерного моделирования влияния параметров кинетической характеристики трения на износ колес и рельсов. 13
- Кипнис И. А., Вернигорюв Ю. М.* Моделирование подъема воды в системах цилиндрических капилляров разного радиуса 22

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Заковоротный В. Л., Губанова А. А., Лукьянов А. Д.* Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай большой скорости резания) 32
- Тугенгольд А. К., Изюмов А. И., Терехов Д. Ю.* Выявление нечеткой границы стойкости режущего инструмента с использованием метода контрольных карт 43
- Карнаухов Н. Ф., Филимонов М. Н., Статовой Д. А., Лыков А. С.* Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования 51
- Ермольев Ю. И., Дорошенко А. А., Белов С. В.* Моделирование процесса сепарации измельченного соломистого вороха в пневмосепараторе с тремя пневмоканалами 59
- Мандровский К. П.* Оценка динамической устойчивости в мониторинговой системе управления технико-экономической эффективностью дорожных машин 69
- Подуст С. Ф.* Оценка коэффициента ослабления вибраций от колесных пар на основание кузова электровоза 77
- Хозяев И. А., Коледов Л. В., Важеннин В. А.* Оценка надежности машин на основе рисков их функционирования 84
- Лимаренко Н. В., Жаров В. П., Панов Ю. В., Шаповал Б. Г.* Экспериментальное исследование влияния массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования индуктора 90
- Степанов В. А., Крахт Л. Н., Меркер Э. Э., Кем А. Ю., Харламов Д. А.* Исследование эффективности электроплавки окатышей в дуговой печи при дожигании оксида углерода топливно-кислородными горелками 97

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Арзуманян Р. В., Сухинов А. И.* Исследование влияния шаблона доступа к глобальной памяти графического процессора на производительность 105
- Илясов В. В., Жданова Т. П., Ершов И. В., Никифоров И. Я.* Зонная структура и магнитные свойства кубических кристаллов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$: Ab initio расчёты 111
- Зыкин С. В., Мосин С. В., Полуянов А. Н.* Технология раздельного формирования многомерных данных 121
- Кобак В. Г., Рудова И. Ш.* Возможности использования элитных особей при решении задачи коммивояжера моделью Гольдберга 129

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

- Харманда М. Г., Антибас И. Р.* Стратегия оптимизации проектирования надежности почвообрабатывающей техники с учетом параметрической неопределенности почвы 136
- Тупольских Т. И., Гучева Н. В.* Исследование влияния параметром электрического питания на производительность вибрационного дозатора с электромагнитным приводом 148
- Пахомов В. И., Брагинцев С. В., Алфёров А. С., Гайдаш М. В., Степанова Ю. В.* Исследования процесса экструдирования смеси зерновых концентратов с измельченной зеленой массой бобовых трав 154

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

- Гапонов В. Л., Кузнецов Д. М.* Метод мониторинга процесса каталитической очистки сточных вод по параметрам акустической эмиссии 160
- Сведения об авторах* 168

CONTENT

MECHANICS

- Solovyev A. N., Shevtsov M. Y.* Reconstruction of defects in elastic bodies by combination of genetic algorithm and finite element method..... 5
- Evelson L. I., Pamfilov E. A., Tsygankov A. G., Shiryayeva L. I.* Study of kinetic performance effect on wheel and rail wear using computer simulation 13
- Kipnis I. A., Vernigorov Yu. M.* Modeling of water rising in systems of cylindrical capillaries of different radii... 22

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

- Zakovorotny V. L., Gubanova A. A., Lukyanov A. D.* Synergetic approach to study forming path stability of the end cutdown milling by side faces (case of high speed cutting) 32
- Tugengold A. K., Izymov A. I., Terekhov D. Y.* Identification of fuzzy boundaries of cutter power using control chart method..... 43
- Karnaikhov N. F., Filimonov M. N., Statovoy D. A., Lykov A. S.* A review of torque ripple reducing methods based on mathematical simulation 51
- Yermolyev Y. I., Doroshenko A. A., Belov S. V.* Modeling of milled straw heap separation in air-flow classifier with three pneumatic ducts 59
- Mandrovskiy K. P.* Evaluation of dynamic stability in monitoring control system by the road machines technical-and-economic efficiency 69
- Podust S. F.* Estimation of vibration attenuation coefficient of wheel sets on electric locomotive underframe..... 77
- Khozyaev I. A., Koledov L. V., Vazhenin V. A.* Reliability evaluation of machines based on their operation risks 84
- Limarenko N. V., Zharov V. P., Panov Y. V., Shapoval B. G.* Experimental study of the working media mass effect on the parameters featuring inductor performance quality..... 90
- Stepanov V. A., Krakht L. N., Merker E. E., Kem A. Y., Kharlamov D. A.* Research of pellet electrosmelting efficiency in arc furnace under the carbon oxide post-combustion by fuel oxygen burners 97

INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT

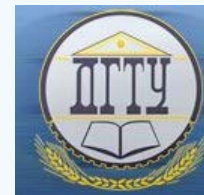
- Arzumanyan A. I., Sukhinov A. I.* Study of access template to graphics engine GM effect on the performance 105
- Ilyasov V. V., Ershov I. V., Zhdanova T. P., Nikiforov I. Y.* Band structure and magnetic properties of cubic crystals $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$: *Ab initio* calculations..... 111
- Zykin S. V., Mosin S. V., Poluyanov A. N.* Technology of separate generation of multidimensional data 121
- Kobak V. G., Rudova I. S.* Applicability of elite samples in solving the traveling salesman problem by Goldberg model 129

PROCESSES AND MACHINES OF AGRO ENGINEERING SYSTEMS

- Kharmanda M. G., Antypas I. R.* Reliability-Based Design Optimization Strategy for Soil Tillage Equipment Considering Soil Parameter Uncertainty 136
- Tupolskikh T. I., Gucheva N. V.* Investigation of power supply parameter effect on performance of vibrator meter with magnetic actuator 148
- Pakhomov V. I., Braginets S. V., Alferov A. S., Gaydash M. V., Stepanova Y. V.* Study on extruding process of grain concentrate mixture with chopped green mass of legumes..... 154

SAFETY OF HUMAN ACTIVITY

- Gaponov V. L., Kuznetsov D. M.* Monitoring technique for catalytic waste treatment by acoustic emission parameters 160
- Index* 171

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 539.37

DOI 10.12737/19686

Реконструкция дефектов в упругих телах сочетанием генетического алгоритма и метода конечных элементов***А. Н. Соловьев¹, М. Ю. Шевцов^{2**}**^{1,2}Донской государственный технический университет, г.Ростов-на-Дону, Российская Федерация**Reconstruction of defects in elastic bodies by combination of genetic algorithm and finite element method*******A. N. Solovyev¹, M. Y. Shevtsov^{2**}**^{1,2}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Проведено моделирование системы неразрушающего контроля дефектов в твердых телах. Рассматриваются обратные геометрические задачи теории упругости для плоской прямоугольной области по реконструкции круговых полостей и трещин, выходящих на поверхность тела. Дополнительной информацией для решения этих задач является набор первых четырех собственных резонансных частот. Решение обратных задач основано на минимизации функционала невязки между измеренной входной информацией и рассчитанной в ходе численного решения прямых задач с заданными параметрами дефектов. В качестве инструмента решения прямых задач используется метод конечных элементов, реализованный в программе FlexPDE. Минимизация функционала осуществляется с помощью генетического алгоритма (ГА), реализованного в разработанной программе GAFEMNDT. В работе описан алгоритм этой программы и настройки ГА, которые используются в численных экспериментах. Приведены результаты этих экспериментов по определению параметров дефектов (координат центра, радиуса, координат выхода трещины на поверхность и ее размер). Эти результаты показывают достаточность дополнительной информации для преодоления некорректности задачи, а также высокую эффективность предложенного алгоритма, как в точности определения параметров дефектов, так и в скорости их поиска.

Modeling of the non-destructive testing system of defects in solids is performed. Specifically, the inverse geometric problems of the elasticity theory for a flat rectangular area on reconstructing circular cavities and cracks breaking the body surface are considered. Additional information for solving these problems is a setting of the first four natural resonance frequencies. The inverse problem solution is based on the minimization of the residual functional between the measured input source information and the data calculated during the numerical solution of direct problems with the given parameters of defects. As a tool for solving direct problems, the finite element method implemented in FlexPDE program is used. The functional minimization is carried out by using a genetic algorithm (GA) implemented in the developed GAFEMNDT program. The program algorithm and GA settings used in the numerical experiments are described. The experiments results on determining parameters of defects (coordinates of centre, radius, coordinates of surface cracking and its size) are presented. The results demonstrate adequacy of the additional information to overcome the problem ill-posedness, as well as high efficiency of the proposed algorithm both in accuracy of detecting defects parameters, and in their search speed.

Ключевые слова: генетический алгоритм, метод конечных элементов, неразрушающий контроль.

Keywords: genetic algorithm, finite element method, non-destructive testing.

Введение. Неразрушающий метод контроля (НРК) — контроль свойств и характеристик объекта, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта к использованию и эксплуатации. Способ НРК прочности заключается в том, что исследуемая конструкция или материал не подвергается механическим разрушениям, контроль осуществляется косвенно путем измерения и математического анализа физико-механических величин, отвечающих за

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: solovievarc@gmail.com, mesouug@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

прочностные свойства конструкции или материала.

Существующие методы неразрушающего контроля, такие как радиоволновой, оптический, капиллярный, тепловой, а также радиационный хорошо зарекомендовали себя и успешно используются в производстве и не только. Но с развитием техники и планомерным увеличением удельной производительности ЭВМ возникают новые возможности для проведения неразрушающего контроля. Одним из таких способов является использование эволюционных алгоритмов при распознавании измеряемой акустической информации об inspected объекте. Среди этих методов наибольшее распространение в задачах дефектоскопии получили применение искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетических алгоритмов (ГА) на этапе минимизации функционалов невязки между измеренной и рассчитанной информацией. Так применению ИНС при идентификации трещиноподобных дефектов в различных конструкциях посвящены работы [1–4] и др. Разработку и использование ГА в задачах идентификации механических свойств упругих тел и реконструкции дефектов можно найти в работах [5–8], в которых в качестве измеренной информации используются данные о вибрации тел или их резонансных частотах.

В настоящей работе показана работоспособность сочетания метода конечных элементов и генетического алгоритма для решения задач НРК, на примере определения параметров внутренней круговой полости и прямолинейной трещины выходящей на поверхность упругого прямоугольника. Идентификация дефектов основана на минимизации функционалов невязки между данными о наборе первых четырех его резонансных частот.

Постановка обратной задачи. Рассмотрим установившиеся колебания с круговой частотой ω упругого тела, занимающего конечную односвязную область V с границей S . Граница области может быть описана объединением непересекающихся областей $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$, причем на S_1 заданы кинематические, а на S_2 — силовые граничные условия. Множество S_3 — это неизвестные границы дефекта (трещина, выходящая на поверхность, внутренняя полость), свободные от напряжений.

Амплитудные характеристики этих колебаний удовлетворяют системе дифференциальных уравнений линейной теории упругости [9]:

$$\sigma_{ij,j} = \rho \omega^2 u_i, \quad \sigma_{ij} = c_{ijkl} u_{k,l} \quad i = 1, 2, 3, \quad \underline{x} \in V, \quad (1)$$

и граничным условиям прямой краевой задачи

$$u_i|_{S_1} = u_i^{(1)}, \quad t_i|_{S_2} = \sigma_{ij} m_j|_{S_2} = p_i, \quad t_i|_{S_3} = 0, \quad (2)$$

где u_i , t_i — компоненты векторов смещений и напряжений; c_{ijkl} — компоненты тензора упругих постоянных; ρ — плотность.

В обратной задаче внутренние границы области S_3 являются неизвестными, информацией для их определения является набор собственных частот колебаний:

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}. \quad (3)$$

На практике наиболее точно определяются набор первых частот, вместе с этим информативность этих данных существенно зависит от вида и размера дефекта, что может быть выражено зависимостью $\omega_i = \omega_i(S_3)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Определение внутренней границы S_3 сводится к нахождению абсолютного (нулевого) максимума функционала, задающего умноженную на -1 норму (в некотором пространстве L) разности между измеренными резонансными (3) и найденными из решения краевой задачи (1)–(2) собственными частотами $\omega_i = \omega_i(\tilde{S}_3)$, $i = 1, 2, \dots, n$, где \tilde{S}_3 — заданная конфигурация дефекта, при этом W — область изменения искомых параметров, характеризующих дефект \tilde{S}_3 , определяется их физическим смыслом. В настоящей работе в качестве такого функционала используется выражение «взвешенной» нормы разности, при которой влияние на его значение изменения всех используемых частот в определенной степени одинаково:

$$F(\tilde{S}_3) = - \left[\sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{\omega_i(\tilde{S}_3)}{\omega_i(S_3)} \right]^2 \right]^{1/2}, \quad \tilde{S}_3 \in W, \quad (4)$$

при этом область W изменения параметров, характеризующих область \tilde{S}_3 , известна и определяется размерами исследуемого образца.

Описание программного обеспечения. Для решения обратных геометрических задач идентификации дефектов разработан и программно реализован комплекс Genetic Algorithm with Finite Element Method in Non-Destructive Testing (GAFEMNDT). Данный программный продукт является связующим звеном между модулем ГА «AI::Genetic::Pro» разработанного Strzelecki Lukasz [10] и конечно-элементном пакетом, причем в настоящей работе был использован FlexPDE. Результатом работы GAFEMNDT является набор параметров, обеспечивающий экстремум функции многих переменных.

Система написана на скриптовом языке программирования PERL [11]. Выбор в пользу скриптового языка был продиктован необходимостью оперативно менять целевую функцию, что является не тривиальной задачей для классических языков, таких как Delphi, C++ и т. д. GAFEMNDT представляет собой модульный PERL-скрипт. Целевая платформа для запуска приложения: Linux.

Входными данными для GAFEMNDT является файл, содержащий в себе описание целевого функционала и предельные значения варьируемых переменных.

Выходными данными модуля GAFEMNDT является текстовый файл, содержащий в себе таблицу с результатами расчета. Решением является строка с максимальным значением целевой функции. Простота представления выходных данных позволяет производить визуальный и статистический анализ практически в любом программном продукте, ориентированном на обработку табличных данных, начиная от офисных пакетов Microsoft Office и LibreOffice и заканчивая узкопрофильными пакетами обработки данных, таких как ParaView и VisIt.

Примеры решения задач неразрушающего контроля.

Ниже приведены результаты численных экспериментов по идентификации круговой полости и прямолинейной трещины, выходящей на поверхность прямоугольника под прямым углом. Идентификации подлежат дискретные параметры, характеризующие координаты центра и радиус окружности, или абсцисса точки выхода трещины на поверхность и ее длина. В качестве значений, характеризующих точность идентификации искомых параметров, рассматривались относительные ошибки e , которые вычислялись по формуле:

$$e = \frac{A - B}{A}, \quad (5)$$

где A — целевое значение искомого параметра; B — варьируемое расчетное значение этого параметра.

Первым шагом минимизации функционала (4) с помощью ГА является настройка его параметров. Проведенные численные эксперименты показали, что наиболее рациональными в смысле «точность — время» являются следующие параметры генетического алгоритма:

Таблица 1

Параметры генетического алгоритма

Параметр	Значение
Размер популяции	128
Разрядность генома	16 бит
Число поколений	<300
Вероятность кроссовера	0,95
Вероятность мутации	0,02
Число родителей	2
Выборка	Рулетка
Стратегия кроссовера	Точечная. 2 точки.
Использовать стратегию элитизма	Да



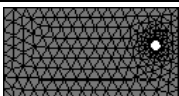
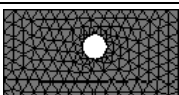
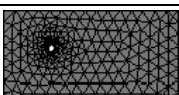
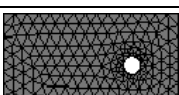
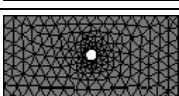
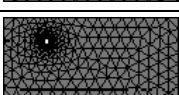
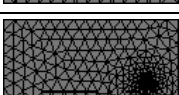
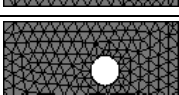
Идентификация полости в прямоугольном теле. Описанную методику проиллюстрируем на задачах идентификации внутренних полостей в прямоугольнике, совершающим собственные колебания в рамках задачи плоской деформации. Размеры прямоугольника: длина 0,02 м, ширина 0,01 м, материал — сталь, модуль Юнга $E = 20 \times 10^{10} \text{ Н / м}^2$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,29$. Правая сторона прямоугольника жестко закреплена, граница внутренней полости свободна от напряжений; X и Y — координаты центра; R — радиус окружности.

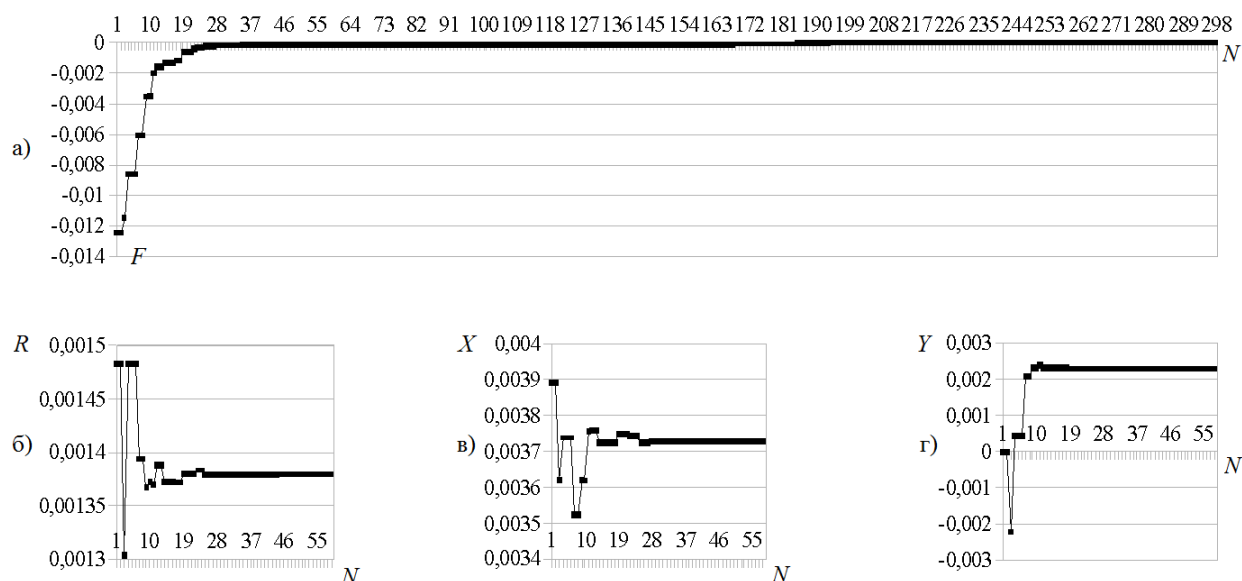
Решение обратной задачи идентификации кругового отверстия осуществляется на основе минимизации функционала (4). В качестве инструмента решения прямой задачи использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в пакете FlexPDE. Роль «измеренных» резонансных частот выполняет набор первых четырех собственных частот, рассчитанных при заданных параметрах дефекта.

В табл. 2 приведены результаты расчета с помощью GAFEMNDT для 10 примеров прямоугольников с отверстиями, которые были выбраны случайным образом.

Таблица 2

Поиск внутренней полости

№ п/п	Изображение	Параметр	Расчет	Цель	Ошибка, %
1		X	0,003739	0,003739	0,0012
		Y	0,002288	0,002288	0,0121
		R	0,001382	0,001382	0,0032
2		X	0,016465	0,016509	0,2678
		Y	0,001982	0,002027	2,1820
		R	0,000288	0,000287	0,1022
3		X	0,017356	0,017356	0,0005
		Y	0,000921	0,000921	0,0079
		R	0,000623	0,000623	0,0007
4		X	0,010452	0,010452	0,0006
		Y	0,001003	0,001003	0,0032
		R	0,001422	0,001422	0,0005
5		X	0,005504	0,005489	0,2733
		Y	0,000987	0,000999	1,2534
		R	0,000377	0,000376	0,4529
6		X	0,000994	0,000994	0,0017
		Y	0,014685	0,014685	0,0016
		R	-0,000559	-0,000559	0,0324
7		X	0,000675	0,000674	0,1095
		Y	0,010039	0,010043	0,0438
		R	0,000754	0,000751	0,3671
8		X	0,000263	0,000263	0,0043
		Y	0,004963	0,004963	0,0011
		R	0,002378	0,002378	0,0031
9		X	0,000146	0,000146	0,0050
		Y	0,016345	0,016345	0,0001
		R	-0,001924	-0,001924	0,0046
10		X	0,001662	0,001662	0,0011
		Y	0,011621	0,011621	0,0008
		R	-0,000262	-0,000262	0,0410

Рис.1. а) Целевая функция; б) R — радиус окружности; в) и г) X и Y — координаты центра окружности

На рис. 1, а представлены графики изменения целевого функционала F (4) и параметров R , X и Y . На рис. 1, б, в и г проиллюстрированы зависимости от N числа эпох ГА для задачи 1 из таблицы 2. Анализ этих результатов показывает, что приемлемая точность идентификации достигается уже при 40 эпохах.

Прямоугольное тело с трещиной, выходящей на поверхность. Вторым примером применения описанной выше методики является идентификация выходящей под прямым углом на поверхность прямолинейной трещины в прямоугольнике длиной 0,05 м, шириной 0,01 м, из того же, что и в п. 3.1, материала. Половина правой стороны прямоугольника закреплена, $X0$ — координата, где трещина выходит на поверхность, YI — глубина трещины (рис. 2).

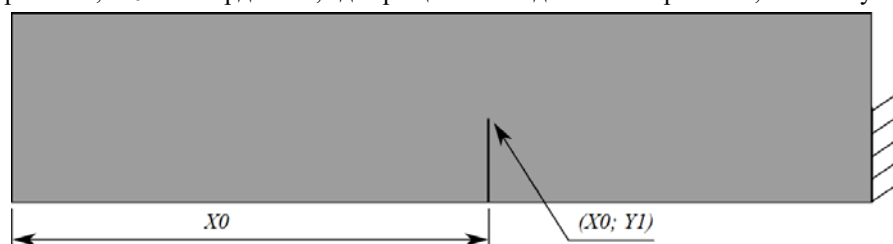


Рис. 2. Модель тела с трещиной

В качестве входных данных были использованы первые три собственные частоты колебаний контролируемого объекта. В табл. 3 представлены результаты идентификации 10 примеров трещин, выходящих на нижнюю сторону прямоугольника.

Таблица 3

Поиск трещины, выходящей на поверхность

№ п/п	Параметр	Расчет	Цель	Ошибка, %
1	$X0$	0,027813	0,027726	0,313126
	YI	0,004534	0,004511	0,510042
2	$X0$	0,021536	0,020737	3,851143
	YI	0,002861	0,002909	1,665110
3	$X0$	0,004740	0,004981	4,855177
	YI	0,002855	0,002702	5,334544
4	$X0$	0,004938	0,004938	0,002417
	YI	0,005032	0,005032	0,001143
5	$X0$	0,042694	0,042701	0,014959
	YI	0,001943	0,001942	0,062128
6	$X0$	0,012682	0,012615	0,531135

	YI	0,004883	0,004903	0,399785
7	$X0$	0,019912	0,019915	0,011219
	YI	0,001901	0,001901	0,012122
8	$X0$	0,024881	0,024931	0,201769
	YI	0,001259	0,001261	0,179161
9	$X0$	0,024716	0,024804	0,354866
	YI	0,001853	0,001871	0,969296
10	$X0$	0,009450	0,009402	0,511221
	YI	0,008899	0,008903	0,048833

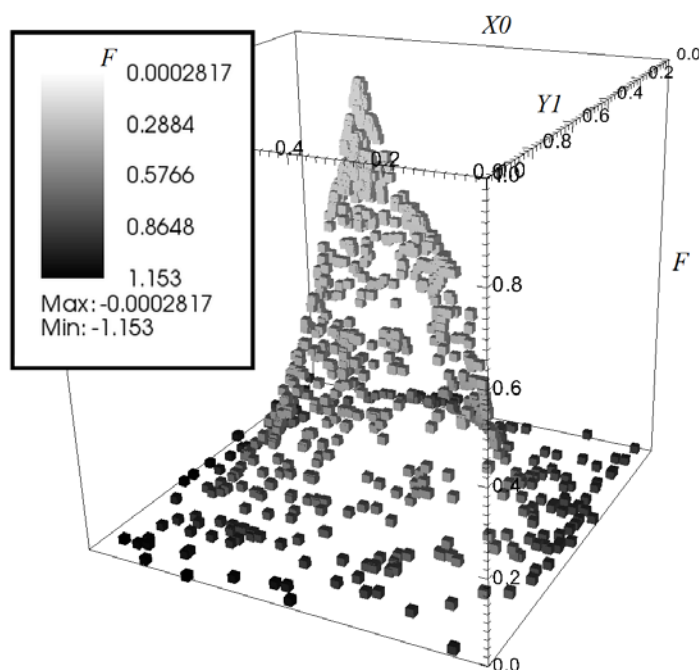
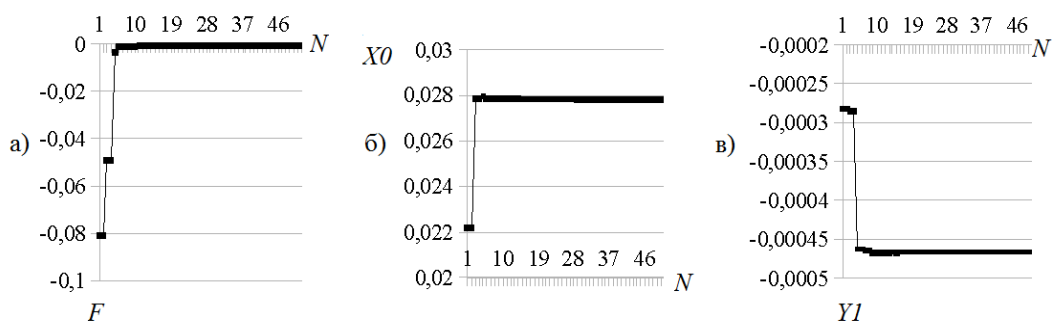


Рис. 3. Целевая поверхность

Рис. 4. а) Целевая функция; б) $X0$ — координата, где трещина выходит на поверхность; в) YI — глубина трещины

На рис. 3 представлен пример целевой поверхности функционала (4) (значения $X0$, YI , F нормированы и изменяются в пределах $[0;1]$). На рис. 4 проиллюстрировано поведение целевой функции и параметров в зависимости от числа эпох N для 1-ой задачи из таблицы 3. Быстрая сходимость алгоритма (20 эпох) объясняется структурой целевой поверхности.

Выводы. Результаты исследования состоят в следующем:

- Определены рациональные параметры настройки ГА, представленные в табл. 1.
- Для определения трех параметров полости (п. 3.1) с достаточной степенью точности требуется не менее четырех собственных частот колебаний. При этом удовлетворительная точность идентификации достигается при 40

поколениях ГА.

• В задаче идентификации трещины (п. 3.2) достаточной информацией оказался набор первых трех резонансных частот, при этом целевая поверхность имеет один экстремум, для нахождения которого достаточно 20 поколений ГА.

Библиографический список

1. Курбатова, П. С. Об использовании нейронных сетей в задачах определения дефектов в упругих телах / П. С. Курбатова, Н. И. Сапрунов, А. Н. Соловьев // Современные проблемы механики сплошной среды : материалы X междунар. конф. — 2006. — С. 175–180.
2. Соловьев, А. Н. Идентификация и исследование критического состояния поперечной трещины в полосе с накладкой на основе искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, Б. В. Соболев, А. А. Краснощечков // Дефектоскопия. — 2014. — Т. 50, №. 8. — С. 23–35.
3. Соловьев, А. Н. Реконструкция дефекта на поверхности труб с помощью сочетания метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, З. Ч. Нгуен // Вестник ЮНЦ РАН. — 2014. — Т. 10, № 2. — С. 9–15.
4. Баранов, И. В. Об одном генетическом алгоритме и его применении в обратных задачах идентификации упругих сред / И. В. Баранов, А. О. Ватульян, А. Н. Соловьев // Вычислительные технологии. — 2006. — Т. 11, № 3. — С. 14–26.
5. Yongyong He. Using genetic algorithms and finite element methods to detect shaft crack for rotor-bearing system / Yongyong He, Dan Guo, Fulei Chu. // Mathematics and Computers in Simulation. — Vol. 57, 1–2. — P. 95–108.
6. Mohammad-Taghi Vakil-Baghmisheh. Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms / Mohammad-Taghi Vakil-Baghmisheh, Mansour Peimani, Morteza Homayoun Sadeghi, Mir Mohammad Eftefagh // Applied Soft Computing. — Vol. 8, 2. — P. 1150–1160.
7. Fernando, S. Damage detection with genetic algorithms taking into account a crack contact model / Fernando S. Buezas, Marta B. Rosales, Carlos P. Filipich // Engineering Fracture Mechanics. — Vol. 78, 4. — P. 695–712.
8. Eleni N. Chatzi. Experimental application and enhancement of the XFEM–GA algorithm for the detection of flaws in structures. / Eleni N. Chatzi, Badri Hiriyur, Haim Waisman, Andrew W. Smyth // Computers & Structures. — Vol. 89, 7–8. — P. 556–570.
9. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. — Москва : Мир, 1975. — 872 с.
10. Efficient genetic algorithms for professional purpose [Электронный ресурс] / CPAN. — Режим доступа : [http : // search.cpan.org /~strzelec / AI-Genetic-Pro-0.4 / lib / AI / Genetic / Pro.pm](http://search.cpan.org/~strzelec/AI-Genetic-Pro-0.4/lib/AI/Genetic/Pro.pm) / (дата обращения : 06.02.2016).
11. Learning Perl [Электронный ресурс] / The Perl Programming Language. — Режим доступа : [http : // www.perl.org](http://www.perl.org) / (дата обращения : 06.02.2016).

References

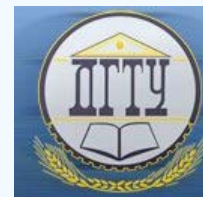
1. Kurbatova, P. S., Saprunov, N.I., Solovyev, A.N. Ob ispol'zovanii neyronnykh setey v zadachakh opredeleniya defektov v uprugikh telakh. [On the use of neural networks in problems of determining defects in elastic bodies.] Sovremennyye problemy mekhaniki sploshnoy sredy: materialy X mezhdunar. konf. [Current problems of continuum mechanics: Proc. X Int. Conf.] 2006, pp. 175–180 (in Russian).
2. Solovyev, A. N., Sobol, B.V., Krasnoshchekov, A.A. Identifikatsiya i issledovaniye kriticheskogo sostoyaniya poperechnoy treshchiny v polose s nakladkoy na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey. [The Identification and Study of the Critical State of a Transverse Crack in a Zone with a Lap Based on Artificial Neural Networks.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 23–35 (in Russian).
3. Solovyev, A. N. Rekonstruktsiya defekta na poverkhnosti trub s pomoshch'yu sochetaniya metoda konechnykh elementov i iskusstvennykh neyronnykh setey. [Reconstructing defect on the surface of pipes using the finite element method and artificial neural network.] Vestnik SSC RAS, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 9–15 (in Russian).
4. Baranov, I. V., Vatulyan, A.O., Solovyev, A.N. Ob odnom geneticheskoy algoritme i yego primenenii v obratnykh zadachakh identifikatsii uprugikh sred. [Genetic algorithm for solving the inverse identification problem for elastic media.] Computational Technologies, 2006, vol 11, no. 3, pp. 14–26 (in Russian).
5. Yongyong He, Dan Guo, Fulei Chu. Using genetic algorithms and finite element methods to detect shaft crack for rotor-bearing system. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 57, no. 1–2, pp. 95–108.

6. Mohammad-Taghi Vakil-Baghmisheh, Mansour Peimani, Morteza Homayoun Sadeghi, Mir Mohammad Etefagh. Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms. *Applied Soft Computing*, vol. 8, no. 2, pp. 1150–1160.
7. Fernando, S. Buezas, Marta B. Rosales, Carlos P. Filipich. Damage detection with genetic algorithms taking into account a crack contact model. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, no. 4, pp. 695–712.
8. Chatzi, Eleni N., Hiriur, Badri, Waisman, Haim, Smyth, Andrew W. Experimental application and enhancement of the XFEM–GA algorithm for the detection of flaws in structures. *Computers & Structures*, vol. 89, no. 7–8, pp. 556–570.
9. Novatskiy, V. *Teoriya uprugosti*. [Theory of elasticity.] Moscow: Mir, 1975, 872 p. (in Russian)
10. Efficient genetic algorithms for professional purpose. CPAN. Available at: [http : // search.cpan.org / ~strzelec / AI-Genetic-Pro-0.4 / lib / AI / Genetic / Pro.pm](http://search.cpan.org/~strzelec/AI-Genetic-Pro-0.4/lib/AI/Genetic/Pro.pm) / (accessed: 06.02.2016).
11. Learning Perl. The Perl Programming Language. Available at: [http :// www.perl.org /](http://www.perl.org/) (accessed: 06.02.2016).

Поступила в редакцию 12.02.2016

Сдана в редакцию 19.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 534:531.43

DOI 10.12737/19697

Исследование с помощью компьютерного моделирования влияния параметров кинетической характеристики трения на износ колес и рельсов*Л. И. Евельсон¹, Е. А. Памфилов², А. Г. Цыганков³, Л. И. Ширяева^{4**}^{1, 2, 3, 4}Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск, Российская Федерация**Study of kinetic performance effect on wheel and rail wear using computer simulation*****L. I. Evelson¹, E. A. Pamfilov², A. G. Tsygankov³, L. I. Shiryayeva^{4**}^{1, 2, 3, 4}Bryansk State Technological Engineering University, Bryansk, Russian Federation

Объектом исследования является система «колесо — рельс». Предмет — компьютерное моделирование изнашивания элементов системы. Цель настоящей работы — изучение зависимости износа колес и рельсов от параметров кинетической характеристики трения. Задачи работы: проанализировать предлагавшиеся ранее математические функции, описывающие кинетическую характеристику трения, на наличие экстремумов, поведение (рост, убывание, монотонность, унимодальность и т. п.) в различных диапазонах изменения параметров; осуществить компьютерное моделирование движения колесной пары по рельсовому пути с вычислением количественных оценок износа колес и рельсов при разных параметрах кинетической характеристики трения; установить качественные закономерности влияния задаваемых при компьютерном моделировании параметров кинетической характеристики на износ. При моделировании использовался программный комплекс «Универсальный механизм». В результате получены значения различных характеристик, связанных с износом (мощность, суммарная и удельная работа силы трения), при разных сочетаниях параметров кинетической характеристики трения. Результаты работы позволяют сделать следующие выводы: при компьютерном моделировании движения железнодорожных экипажей необходимо учитывать параметры кинетической характеристики трения, так как в диапазонах значений, соответствующих реальным условиям, они могут существенно влиять на износ; при некоторых сочетаниях значений вышеупомянутых параметров наблюдаются ситуации, когда увеличение коэффициента трения сопровождается снижением износа. Предлагается продолжить исследование в двух основных направлениях: установление закономерностей влияния на кинетическую характеристику трения и износ многообразных реальных факторов и изучение по той же методике влияния на износ параметров динамической (при переменной скорости) характеристики трения.

The study object is a “wheel — rail” system. The subject is the computer simulation of the system elements wear. The work objective is to investigate the wheel and rail wear dependence on the kinetic performance parameters. The problems solved here are analysis of the earlier proposed mathematical functions describing the kinetic performance for the presence of extremes, the functional behavior (growth, decrease, monotonicity, and unimodality, etc.) in various parameter ranges; implementation of the computer simulation of the wheelpair movement by rail with the quantitative estimation of the wheel and rail wear with various kinetic performance parameters; to determine qualitative influence patterns of the kinetic wear performance. The simulation is fulfilled by the software package “Universal Mechanism”. As a result, values of various characteristics related to wear (power, total and specific friction work) under different conditions of the kinetic friction performance are obtained. The conclusions are as follows. The kinetic friction performance parameters must be considered as they can significantly affect the wear within the range of the actual operating conditions in the course of the computer simulation. Under some conditions, there are cases when an increase in the friction coefficient is accompanied by a decrease in depreciation. It is proposed to continue the research in two main areas: determining the influence patterns on the kinetic friction performance and wear of the multiple actual factors, and studying the dynamic (at variable slip velocity) feature of friction effect on the parameter wear through the same procedure.

Ключевые слова: трение, износ, кинетическая характеристика, скорость скольжения, коэффициент трения, удельная работа, колесо, рельс, компьютерное моделирование, факторы.

Keywords: friction, wear, kinetic characteristic, slip velocity, friction coefficient, specific work, wheel, rail, computer simulation, factors.

Введение. Износ колес и рельсов представляет собой очень важную и актуальную проблему, от которой во многом зависит эффективность работы железнодорожного транспорта. Ежегодные потери в масштабе железных дорог

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: levelmoscow@mail.ru, pamfilov@bgita.ru, 79529698301@yandex.ru, Golf3_007@mail.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

России исчисляются миллиардами рублей [1]. Основным практическим методом борьбы с износом является лубрикация, направленная на снижение трения в системе «колесо — рельс». Однако таким образом решается лишь часть проблемы и далеко не всегда достигаются желаемые результаты. Большое значение имеет возможность прогнозирования износа и его изменений при осуществлении различных мероприятий. Такую возможность дает компьютерное моделирование взаимодействия железнодорожного экипажа и пути. Одним из хорошо известных и многократно проверенных инструментов такого моделирования является программный комплекс «Универсальный механизм» (далее «УМ»), разработанный в Брянском государственном техническом университете коллективом под руководством профессора Д. Ю. Погорелова. Описание возможностей УМ представлено в [2–5]. Комплекс, в частности, позволяет моделировать движение экипажа на прямых и кривых участках пути, вычислять различные величины, связанные с износом колес и рельсов.

Износ колес и рельсов сильно зависит от трения, на которое, в свою очередь, существенно влияют разнообразные количественные и качественные факторы. Большое значение имеет зависимость силы трения от скорости скольжения, поскольку качение колеса по рельсу часто сопровождается проскальзыванием. Исследование этой зависимости проводилось много лет. Еще в XIX веке на основе экспериментальных данных были получены эмпирические формулы, связывающие коэффициент трения и скорость скольжения. Такие исследования проводились и в XX веке, продолжают они и в настоящее время. Различные формулы представлены в работах [6–8]. Между тем до сих пор нет ясности, насколько хорошо предлагаемые зависимости отражают реальные случаи, и как следует задавать различные их параметры в разных ситуациях с учетом многообразия действующих реальных факторов. В программном комплексе УМ используется формула, которая, как будет показано ниже, по сути является частным случаем известной формулы И. В. Крагельского — С. В. Щедрова [6]. В описании комплекса УМ [5] приводятся некоторые рекомендации по выбору параметров в зависимости от типа локомотива, влажности, наличия лубрикации. Представляет интерес изучение уровня чувствительности результатов компьютерного моделирования по износу к задаваемым параметрам. Кроме того, важно установить, каким образом изменение этих параметров в более широких пределах влияет на рассматриваемые процессы. На наш взгляд, такое исследование может, с одной стороны, помочь оценить точность компьютерного моделирования износа колес и рельсов, а с другой стороны — расширить понимание влияния различных факторов зависимости трения от скорости скольжения в целом. Последняя проблема имеет в трибологии большое значение, поскольку, как было установлено в многочисленных теоретических и экспериментальных исследованиях, такая зависимость является ключевой для возникновения фрикционных автоколебаний, которые играют значительную роль в различных областях техники [7]. Как показано в работах [8, 9], на эту зависимость большое влияние оказывают многочисленные взаимосвязанные количественные и качественные факторы. Попытка оценки этого влияния методами планирования эксперимента была сделана в [10]. В работах [11–13] были рассмотрены особенности трибологической информации и выработаны специальные методы ее анализа. Ниже представлена практическая реализация одного из предложенных там подходов для изучения кинетической характеристики трения в задачах, связанных с износом колес и рельсов. Результаты сопоставлялись как с уже упомянутыми отечественными работами [9, 10], так и с зарубежными исследованиями [14, 15], что позволило обосновать приводимые ниже выводы.

Анализ математических функций, выражающих кинетическую характеристику трения. Предварительное изучение функций, выражающих кинетическую характеристику трения, выполнялось простейшими методами математического анализа с применением программы MATHCAD.

Наиболее универсальной формулой кинетической характеристики трения является формула Крагельского [7]:

$$f(v) = (a + bv)e^{-cv} + d \quad (1)$$

Здесь v — скорость скольжения, a, b, c, d — параметры кинетической характеристики. Физический смысл этих параметров связан сложными многофакторными зависимостями со свойствами материалов, поверхностей, конструкции узла трения, нагруженности и внешних условий. Качественный анализ этих зависимостей представлен в [6]. Количественное определение a, b, c, d из теоретических соображений пока не представляется возможным. В работе [7] кратко описана методика их экспериментального определения. Подробно различные подходы проанализированы в [8].

В программном комплексе УМ заложена более простая по сравнению с (1) формула:

$$g(v) = f_0 \left((1 - A)e^{-Bv} + A \right) \quad (2)$$

Очевидно, что формула (2) является частным случаем формулы (1), т. е. функция $f(v)$ переходит в $g(v)$, если: $d = f_0 A$; $c = B$; $a = f_0(1 - A)$; $b = 0$.

Качественный физический смысл параметров A и B наглядно проявляется при поочередном приравнивании их к некоторым характерным значениям. Если $A = 0$, то получаем:

$$g(v) = f_0 e^{-Bv}. \quad (2a)$$

Формула (2а) выражает монотонно убывающую функцию, и параметр B определяет скорость убывания. Величина B существенно зависит от температуры и давления.

Если $A = 1$, то

$$g(v) = f_0, \quad (2b)$$

т. е. кинетическая характеристика вырождается в константу — коэффициент трения покоя.

Если $B = 0$, то при любом A приходим к случаю (2b), т. е. при равенстве параметра B нулю функция $g(v)$ также вырождается в константу, являющуюся коэффициентом трения покоя. Если B находится в интервале $(-\infty; 0)$, то функция $g(v)$ является возрастающей. Если параметр B находится в интервале $(0; +\infty)$, то функция является убывающей.

Найдем первую и вторую производные функции $g(v)$ по v . После преобразований получим:

$$g'(v) = f_0(A-1)Be^{-Bv}, \quad (3)$$

$$g''(v) = f_0(1-A)B^2e^{-Bv}. \quad (4)$$

Согласно [7], в трибологических задачах (в частности, для взаимодействия колеса и рельса), как правило, $0 < A < 1$ и $B > 0$. Анализ формул (2)–(4) показывает, что такая ситуация соответствует монотонно убывающей функции $g(v)$, и ее график является вогнутым.

Рассмотрим теперь функцию $f_{mp}(A, B)$, т. е. ту же кинетическую характеристику трения, задаваемую функцией $g(v)$ по формуле (2), но при неизменной скорости и переменных параметрах A и B . С целью упрощения значение коэффициента трения $f_{mp} = g$, получаемое по формуле (2), делится на константу f_0 (обозначим частное как f_{tp2} :

$$f_{tp2} = \frac{f_{tp}}{f_0} = (1-A)e^{-Bv} + A. \quad (5)$$

При $B = \text{const}$:

$$\frac{\partial f_{mp2}}{\partial A} = (e^{-Bv} - Ae^{-Bv} + A)' = A(1 - e^{-Bv}), \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_{mp2}}{\partial A} > 0 \text{ при } B > 0 \text{ и } A > 0.$$

При $A = \text{const}$:

$$\frac{\partial f_{mp2}}{\partial B} = (e^{-Bv})' - A(e^{-Bv})' = -Be^{-Bv} + ABe^{-Bv} = Be^{-Bv}(A-1), \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_{mp2}}{\partial B} > 0 \text{ при } B > 0 \text{ и } A > 1.$$

При $A < 1$, $\frac{\partial f_{mp2}}{\partial B} < 0$, т. е. с ростом B f_{mp2} уменьшается.

Методы, инструменты и результаты компьютерного моделирования. В качестве инструмента для проведения компьютерного моделирования использовался программный комплекс УМ — в частности, его модуль УМ Лосо, позволяющий моделировать движение железнодорожных экипажей. Был выбран компонент «колесная пара с 6 степенями свободы». Рассматривалось движение на прямых и кривых участках, причем брались правые кривые и соответственно вычислялся износ левых колес в колесной паре (по умолчанию в УМ Лосо рассматриваются правые кривые, поэтому износ обычно определяется на левых (набегающих) колесах). В данной работе использовалась упрощенная расчетная схема: одиночная колесная пара, катящаяся по рельсовому пути. В результате моделирования определялись количественные характеристики, непосредственно связанные с износом: мощность силы трения (M_{wear}), работа силы трения (A_{wear}), удельная работа силы трения (S_{wear}). Мощность силы трения при двухточечном контакте определяется как скалярное произведение силы крипа (трения) на гребне и скорости колес относительно рельса в точке контакта и рассчитывается по формуле:

$$M_{wear} = -F_{2x}v_{2x} - F_{2y}v_{2y} \text{ (Вт)}, \quad (8)$$

$$A_{wear} = \int_0^t M_{wear} dr \text{ (Дж)}, \quad (9)$$

$$S_{wear} = \frac{A_{wear}}{S} \text{ (Дж/м)}, \quad (10)$$

где S — пройденный путь.

Некоторые задававшиеся параметры моделирования представлены на рис. 1.

Инспектор моделирования объекта

Интегратор	Идентификаторы	Начальные условия
Переменные объекта	Колесо/Рельс	XVA
		Информация

Путь - Путь, пройденный ... \geq 100

Шаг представления результатов 0.02

Погрешность 1E-6

Контактные силы Трение Статические нагрузки

☐ Лубрификация боковой поверхности

Зависимость от проскальзывания

$$f=f_0[(1-A)\exp(-B*vs)+A]$$

☒ A 0.20 B (с/м) 0.90

Макрогеометрия Неровности Параметры

Геометрия шпал

Длина 2.750 Ширина 0.250

Высота 0.165 Шаг 0.600

Тип пути

☐ Прямая ☐ S-Кривая ☒ Кривая

Первый участок

L1 10 S1 200

P11 50 R1 300

H1 0.09 dY1 0.01

P12 50

L 310

V' 12.947557

Рис. 1. Параметры моделирования изнашивания элементов системы «колесо — рельс»

Во вкладке программы «Колесо/Рельс — Трение» (рис. 1) задаются коэффициенты A и B , входящие в исследуемую зависимость силы трения от скорости скольжения. Здесь же приведена формула (2), используемая в программе.

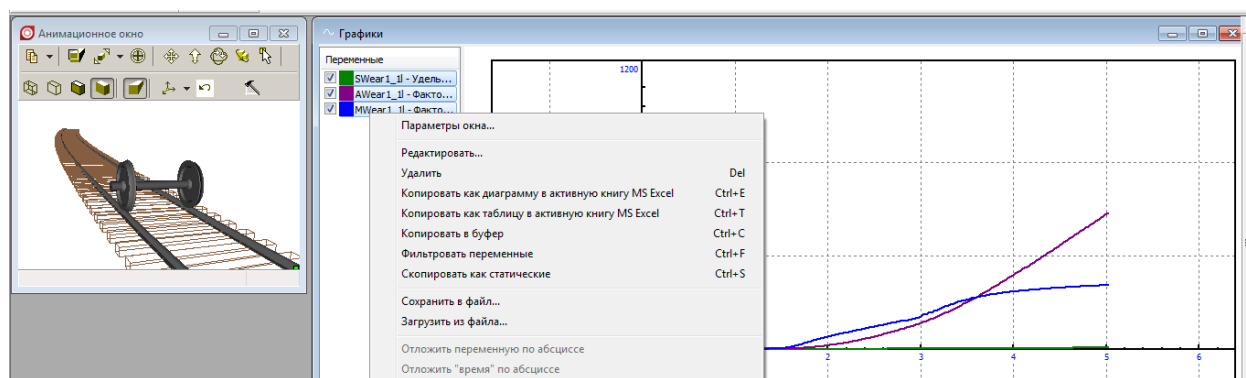


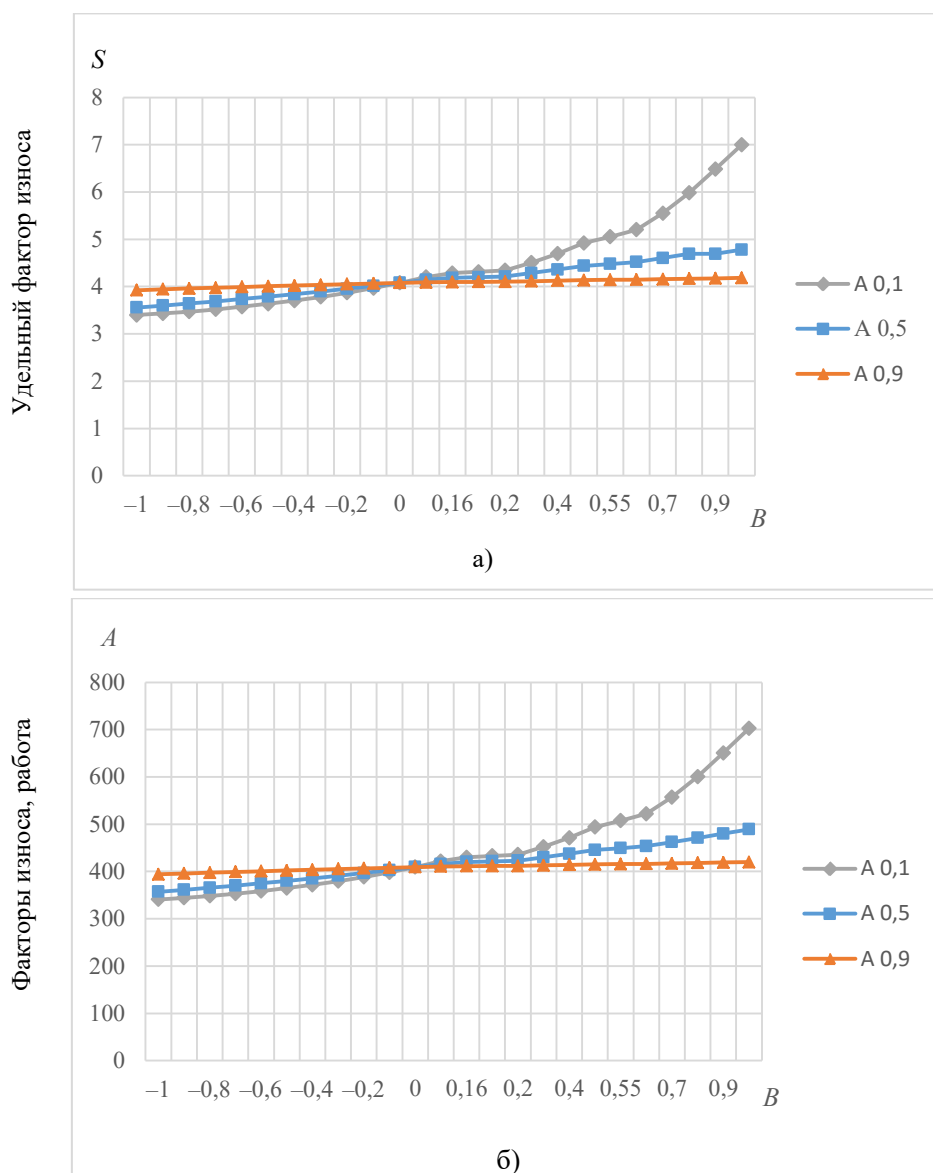
Рис. 2. Задание параметров зависимости трения от скорости

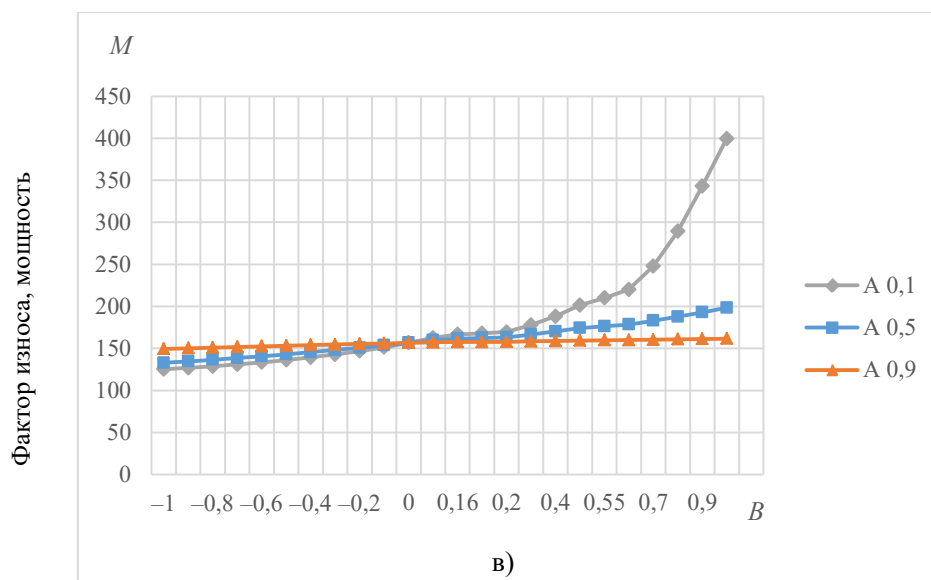
Результаты моделирования — значения S_{wear} , A_{wear} и M_{wear} , вычисленные по формулам (8)–(10) по найденным для данных моментов времени силовым и кинематическим переменным, можно перенести в MS Excel (фрагмент представлен на рис. 3). Столбец «Абсцисса» содержит модельное время в секундах, в других столбцах содержатся значения параметров в указанный момент времени.

	A	B	C	D	E	F
1	Абсцисса	SWear1_1l	Абсцисса	AWear1_1l	Абсцисса	MWear1_1l
236	4.68	5.2779846	4.68	493.847534	4.68	267.419434
237	4.7	5.3125162	4.7	499.2005	4.7	267.856842
238	4.72	5.346848	4.72	504.562195	4.72	268.287109
239	4.74	5.380981	4.74	509.932373	4.74	268.710693
240	4.76	5.4149156	4.76	515.310974	4.76	269.128174
241	4.78	5.4486542	4.78	520.697876	4.78	269.539032
242	4.8	5.4821968	4.8	526.092896	4.8	269.943848
243	4.82	5.5155454	4.82	531.495972	4.82	270.342865
244	4.84	5.5487008	4.84	536.906982	4.84	270.735748
245	4.86	5.5816641	4.86	542.325806	4.86	271.123138

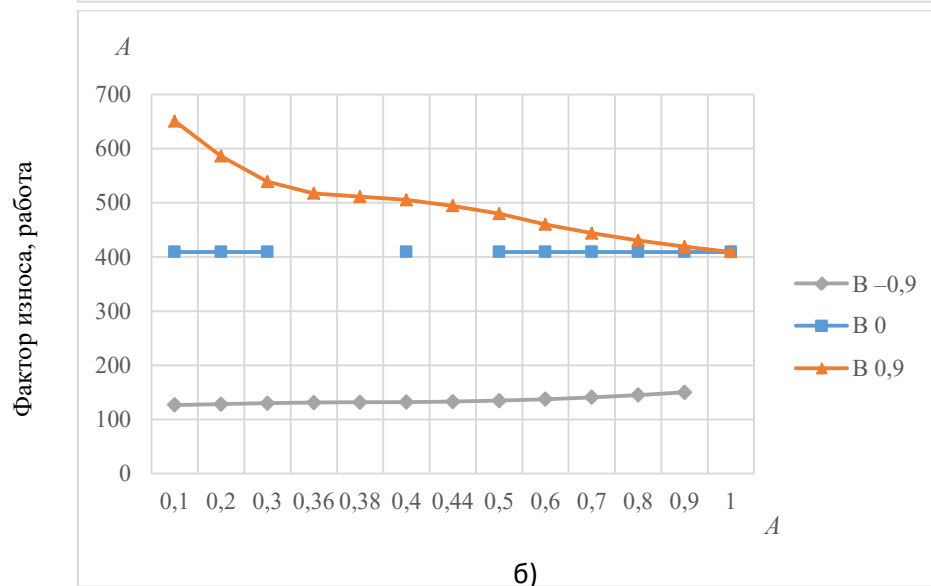
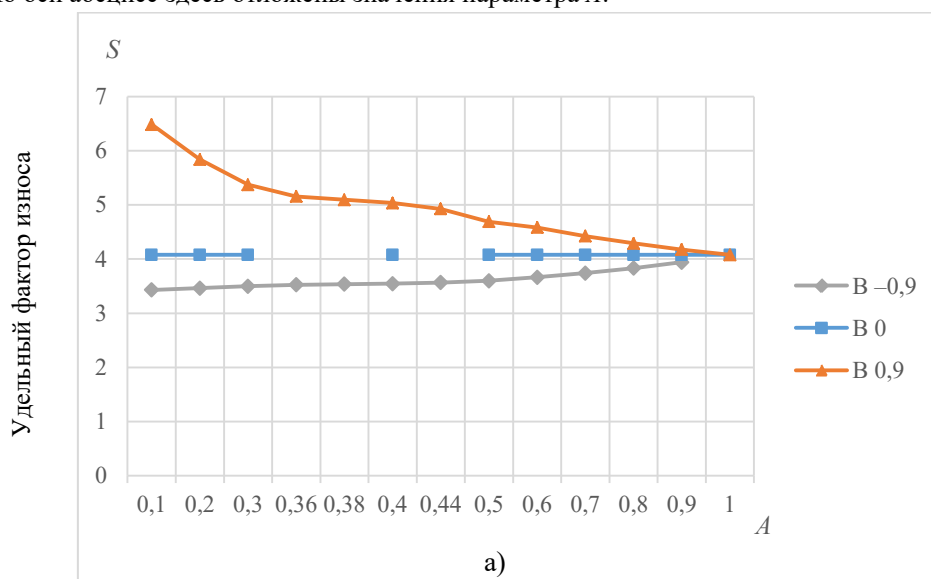
Рис. 3. Фрагмент результатов в окне MS Excel

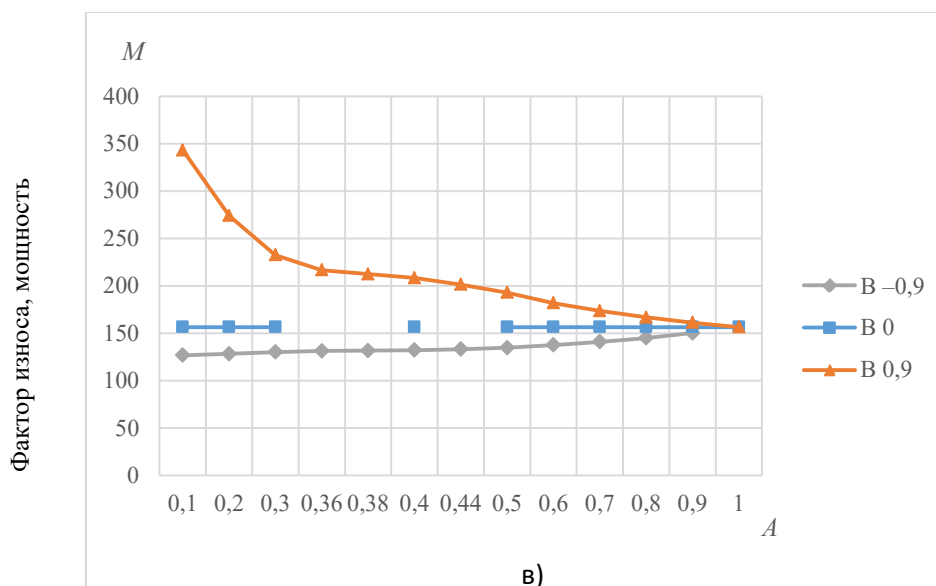
Компьютерное моделирование производилось многократно с различными значениями параметров A и B . На рис. 4 представлены графики, построенные на основании полученных результатов. По оси абсцисс указаны значения параметра B в диапазоне от -1 до 1 , а по оси ординат — значения, связанные с износом исследуемых величин при указанных выбранных значениях параметра A .



Рис. 4. Графики характеристик износа при некоторых значениях A

На рис. 5 представлены графики изменения тех же связанных с износом величин при некоторых различных значениях B . По оси абсцисс здесь отложены значения параметра A .



Рис. 5. Графики характеристик износа при некоторых значениях B

Шаг и диапазоны изменения по параметрам A и B выбирались, исходя из намерений изучить чувствительность результатов к их изменению. Надо особо отметить, что ряд расчетов выполнялся с отрицательными значениями B в соответствии с возрастающей кинетической характеристикой трения. В реальном взаимодействии колеса и рельса такие случаи встречаются относительно редко, но они возможны при некоторых условиях смазывания и, кроме того, представляют теоретический интерес.

В табл. 1 представлены данные, полученные в результате анализа рис. 4, 5 и характеризующие разброс исследуемых параметров износа.

Таблица 1

Сводные показатели износа

	<i>min</i>	<i>max</i>	рост, %
S_{wear}	3,38	7,85	132,45
A_{wear}	338,90	787,90	132,46
M_{wear}	124,40	485,90	290,62

Как видно из табл. 1, разброс (разница между наименьшим и наибольшим значением) значительный по всем трем характеристикам, особенно чувствительной оказалась величина M_{wear} .

В табл. 2 содержатся значения коэффициентов A и B , приведенные непосредственно в программном комплексе УМ в качестве предлагаемых при компьютерном моделировании для некоторых типов локомотивов и при различном состоянии рельсов (влажные или сухие).

Таблица 2

Рекомендуемые в УМ значения коэффициентов A и B

Наименование	A	B
Локомотив, сухой рельс	0,4	0,6
Локомотив, влажный рельс	0,4	0,2
Локомотив SD45X, сухой рельс	0,44	0,6
Локомотив DB127, сухой рельс	0,38	0,7
Локомотив S252, сухой рельс	0,36	0,55
Локомотив SBB460, влажный рельс	0,5	0,16
Локомотив 12X, влажный рельс	0,4	0,4
Локомотив SD45X, влажный рельс	0,38	0,18

Анализ разброса результатов, собранных в табл. 3, относящихся к предлагаемым в УМ значениям A и B , показывает, что в этой области разница между наибольшим и наименьшим значениями характеристик износа не превышает 22 %. Надо отметить, что сама область является весьма узкой, и многие факторы, влияющие на кинетическую характеристику трения (температура окружающей среды, наличие и тип смазки, загрязнения и др.) здесь не учтены. Эти вопросы требуют дополнительного всестороннего исследования.

Таблица 3

Сводные показатели по предустановленным в программе параметрам

	<i>min</i>	<i>max</i>	рост, %
S_{wear}	4,14	4,80	16
A_{wear}	415,07	481,94	16
M_{wear}	159,40	194,18	22

По результатам компьютерного моделирования можно сделать также следующие выводы:

- при увеличении значения параметра B увеличиваются значения исследуемых характеристик износа S_{wear} , A_{wear} , M_{wear} ;
- при увеличении значения коэффициента A уменьшаются значения исследуемых характеристик износа S_{wear} , A_{wear} , M_{wear} , кроме случая при $B = 0$, когда эти характеристики не изменяются.

Отметим, что сопоставление последнего вывода со значениями найденных выше первых частных производных (при $B > 0$ и $0 < A < 1$ $\frac{\partial f_{mp2}}{\partial A} > 0$ и $\frac{\partial f_{mp2}}{\partial B} < 0$), говорит о том, что увеличение коэффициента трения может сопровождаться уменьшением работы силы трения и износа.

Выводы. Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В области значений параметров кинетической характеристики трения, соответствующих реальным ситуациям взаимодействия колеса и рельса, влияние их изменений на износ в общем случае является существенным, т. е. при компьютерном моделировании взаимодействия колеса и рельса надо учитывать зависимость коэффициента трения от скорости, если в задачу входит оценка износа.
2. Как показывает компьютерное моделирование движения колесной пары по рельсовому пути, при падающей кинетической характеристике трения уменьшение коэффициента трения может сопровождаться увеличением характеристик износа.
3. В трибодинамических системах значение коэффициента трения является функцией мгновенной скорости скольжения, которая изменяется во времени. Поэтому для компьютерного моделирования движения железнодорожных экипажей желательно использовать не кинетическую, а динамическую характеристику трения, которая может от нее существенно отличаться. Это требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Богданов, В. М. Обеспечение устойчивой работы системы колесо — рельс на отечественных и зарубежных железных дорогах / В. М. Богданов // Вестник ВНИИЖТ. — 2010. — № 2. — С. 10–14.
2. Погорелов, Д. Ю. Компьютерное моделирование динамики рельсовых экипажей / Д. Ю. Погорелов // Механика и трибология транспортных систем — 2003 : сб. докладов междунар. конгресса. — Ростов-на-Дону, 2003. — Т. 1. — С. 226–231.
3. Use of Multibody System Approach for Torque and Drag Analysis of Long Drill Strings / D. Pogorelov [et al.] // 11th world congress computational mechanics. — Barcelona, 2014. — P. 688–699.
4. Универсальный механизм — программный комплекс для моделирования динамики механических систем [Электронный ресурс] / Лаборатория вычислительной механики Брянского гос. техн. ун-та. — Режим доступа: <http://www.umlub.ru> (дата обращения: 20.02.16).
5. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — Москва : Машиностроение, 1977. — 526 с.
6. Крагельский, И. В. Фрикционные автоколебания / И. В. Крагельский, Н. В. Гитис. — Москва : Наука, 1987. — 182 с.
7. Евельсон, Л. И. Методология математического и компьютерного моделирования трибодинамических систем / Л. И. Евельсон. — Брянск : БГИТА, 2015. — 204 с.
8. Построение базы знаний для систематизации опыта исследований взаимодействия колеса и рельса // Л. И. Евельсон [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 4. — С. 21–26.

9. Захаров, С. М. Анализ влияния параметров экипажа и пути на интенсивность износа в системе колесо — рельс (на основе полного факторного эксперимента) / С. М. Захаров, Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2010. — № 2. — С. 31–35.
10. Евельсон, Л. И. Некоторые методы анализа трибологической информации / Л. И. Евельсон // Трение и износ. — 2003. — Т. 24, № 3. — С. 323–328.
11. Eelson, L. Multilevel information model of tribological systems / L. Eelson, M. Rafalovskaya // International Conference WOM-2011. — Philadelphia, 2011. — P. 501.
12. Eelson, L. Actuality and Perspectives of Triboinformatics / L. Eelson, M. Rafalovskaya // 5th World Tribology Congress. — Torino, 2013. — P. 70–71.
13. M. Ignesti, M. Malvezzi, L. Marini, E. Meli, and A. Rindi. Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems // Wear. — 2012. — Vol. 284/285. — P. 1–17.
14. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear / F. Braghin [et al.] // Wear. — 2006. — Vol. 261. — P. 1253–1264.

References

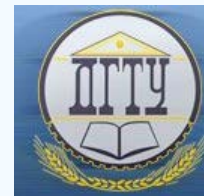
1. Bogdanov, V.M. Obespechenie ustoychivoy raboty sistemy koleso — rel's na otechestvennykh i zarubezhnykh zheleznnykh dorogakh. [Ensuring stable operation of wheel – rail system on domestic and foreign railways.] Vestnik VNIIZHT, 2010, no. 2, pp. 10–14 (in Russian).
2. Pogorelov, D.Y. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhey. [Computer simulation of the railway vehicle dynamics.] Mekhanika i tribologiya transportnykh sistem — 2003: sb. dokladov mezhdunar. kongressa. [Mechanics and tribology of transport systems – 2003: Proc. Int. Congress.] Rostov-on-Don, 2003, vol. 1, pp. 226–231 (in Russian).
3. Pogorelov, D., et al. Use of Multibody System Approach for Torque and Drag Analysis of Long Drill Strings. 11th world congress computational mechanics. Barcelona, 2014, pp. 688–699.
4. Universal'nyy mekhanizm — programmnyy kompleks dlya modelirovaniya dinamiki mekhanicheskikh system. [Universal Mechanism - software for modeling the mechanical systems dynamics.] Computational Mechanics Laboratory, Bryansk State Technical University. Available at: <http://www.umlub.ru> (accessed: 20.02.16) (in Russian).
5. Kragelskiy, I.V., Dobychin, M.N., Kombalov, V.S. Osnovy raschetov na trenie i iznos. [Basics of calculations for friction and wear.] Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p. (in Russian).
6. Kragelskiy, I.V., Gitis, N.V. Friksionnye avtokolebaniya. [Self-excited frictional oscillations.] Moscow: Nauka, 1987, 182 p. (in Russian).
7. Eelson, L.I. Metodologiya matematicheskogo i komp'yuternogo modelirovaniya tribodinamicheskikh system. [Methodology of mathematical and computer modeling of tribodynamic systems.] Bryansk: BGITA, 2015, 204 p. (in Russian).
8. Eelson, L.I., et al. Postroenie bazy znaniy dlya sistematizatsii opyta issledovaniy vzaimodeystviya kolesa i rel'sa. [Development of knowledge base for systematization of research experience concerning interaction between wheels and rail.] Herald of Computer and Information Technologies, 2014, no. 4, pp. 21–26 (in Russian).
9. Zakharov, S.M., Pogorelov, D.Yu., Simonov, V.A. Analiz vliyaniya parametrov ekipazha i puti na intensivnost' iznosa v sisteme koleso — rel's (na osnove polnogo faktornogo eksperimenta). [Analysis of influence of rolling stock and track parameters on indices determining wear rate at wheel – rail system.] Vestnik of the Railway Research Institute, 2010, no. 2, pp. 31–35 (in Russian).
10. Eelson, L.I. Nekotorye metody analiza tribologicheskoy informatsii. [Some methods of analyzing tribological information.] Journal of Friction and Wear, 2003, vol. 24, no. 3, pp. 323–328 (in Russian).
11. Eelson, L., Rafalovskaya, M. Multilevel information model of tribological systems. International Conference WOM-2011. Philadelphia, 2011, pp. 501.
12. Eelson, L., Rafalovskaya, M. Actuality and Perspectives of Triboinformatics. 5th World Tribology Congress. Torino, 2013, pp. 70–71.
13. Ignesti, M., Malvezzi, M., Marini, L., Meli, E., and Rindi, A. Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems. Wear, 2012, vol. 284/285, pp. 1–17.
14. Braghin, F., et al. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear. Wear, 2006, vol. 261, pp. 1253–1264.

Поступила в редакцию 13.10.2015

Сдана в редакцию 15.10.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 581.1

DOI 10.12737/19702

Моделирование подъема воды в системах цилиндрических капилляров разного радиуса*

И. А. Кипнис¹, Ю. М. Вернигоров^{2**}¹Научно-производственная фирма «КАСИОР», г. Москва, Российская Федерация²Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Modeling of water rising in systems of cylindrical capillaries of different radii***

I. A. Kipnis¹, Yu. M. Vernigorov^{2**}¹“KASIOR” Research and Production Company, Moscow, Russian Federation²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Детально изучено продвижение воды в системах цилиндрических капилляров. Построена математическая модель продвижения воды как в симметричных, так и в несимметричных капиллярах, соединенных с вертикальным капилляром. При этом радиусы как вертикальных, так и расположенных под углом капилляров, считались одинаковыми. На основании математической модели установлены общие свойства продвижения воды в ветвящихся капиллярах. В частности, наибольшее продвижение воды происходит в нижнем уровне капилляров. Установлено, что своей формой растения обязаны наличию в них капиллярных систем. Однако капиллярные системы различных частей растений отличаются радиусами. Например, диаметр центральной жилки листа больше диаметра капилляров листовой пластинки. В работе рассмотрены закономерности продвижения воды в ветвящихся капиллярных системах с капиллярами разного радиуса. Получено выражение для расчета критической высоты вертикального капилляра, при которой вода не поступает в наклонные капилляры из вертикального. Показано, что при определенных условиях высота подъема воды в вертикальном капилляре может до двух раз превышать высоту подъема воды в одиночном вертикальном капилляре того же радиуса.

The promotion of water in the systems of cylindrical capillaries is studied in detail. A mathematical model of the water movement in both symmetric and asymmetric capillaries connected to a vertical capillary is built. In this case, the radii of both vertical and angled capillaries are considered identical. General properties of the water movement in branching capillaries are determined on the basis of the mathematical model. In particular, the greatest promotion of water occurs in the lower level of the capillaries. It is found that the shape of plants depends on the presence of capillary systems in them. However, the capillary systems of various parts of the plants differ in radii. For example, the diameter of the central capillary of a leaf is larger than that of the capillaries in the lamina. The patterns of water movement in the branching capillary systems with capillaries of different radii are considered. An expression for calculating the critical vertical capillary height at which water does not come from the vertical capillary to the inclined capillaries is obtained. It is shown that under certain conditions, the height of water in a vertical capillary can twofold exceed the height of water in a single vertical capillary of the same radius.

Ключевые слова: растение, капилляры, ксилема, модель, транспирация.

Keywords: plant, capillaries, xylem, model, transpiration.

Введение. Движение и распределение воды в растениях изучается в течении многих десятилетий и описано в монографиях по физиологии растений [1–2]. Детально описано и анатомическое строение водопроводящих путей (ксилемы) в растениях [3–5]. Многочисленные экспериментальные исследования различных аспектов движения воды в ксилеме растений опубликованы в научной литературе. Так, например, в [6] рассмотрены вопросы накопления и депонирования воды во флоэме и последующий ее возврат в ксилему при дефиците почвенной влаги. В [7] рассмотрены вопросы продвижения воды в ксилеме в условиях климатического стресса. Однако, до настоящего времени в лите-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: ikipnis@yandex.ru, jvernigorov@dstu.edu.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ратурных источниках дискутируется вопрос о силах, обеспечивающих подъем и распределение воды при её продвижении в ксилеме [8].

В работах [9–11] изучено продвижение воды в ветвящихся симметричных и несимметричных капиллярных системах, все ветви которых представляют собой цилиндрические капилляры одинакового радиуса, соединенные с вертикальным капилляром того же радиуса и расположенные под углом к нему. Установлено, что наибольшее продвижение воды как в прямолинейных, так и в криволинейных боковых ветвях происходит в самом нижнем уровне и уменьшается в ветвях каждого из последующих уровней. Наличие боковых капилляров приводит к увеличению высоты подъема воды в вертикальном капилляре по сравнению с одиночным вертикальным капилляром того же радиуса. Формой растения и их части обязаны наличию в них капиллярных систем [9–11]. Доказано, что единственной силой, обеспечивающей подъем воды в ксилеме растений, является сила поверхностного натяжения воды в менисках капилляров [10]. При этом линия, последовательно соединяющая мениски воды в капиллярах ветвей разных уровней, образует фигуру, по форме напоминающую коническую крону дерева или листа. Корневое давление компенсирует, как максимум, гидравлические потери, возникающие при движении воды через систему окаймленных пор трахеид ксилемы хвойных растений [12]. Принятые в работах [9–11] модели идеализированы, но в природе такая идеализация не наблюдается. Диаметр ствола и ветвей нижних уровней больше, чем диаметр ветвей более высоких уровней и ветвей более высоких порядков. По мере роста дерева диаметр существующих ветвей увеличивается. Одновременно с этим появляются новые ветви, диаметр которых значительно меньше диаметра уже имеющихся ветвей. Диаметр капилляров центральной жилки листа больше диаметра связанных с ним капилляров листовой пластинки и т. д.

Цель работы. Определение закономерностей продвижения и распределения воды в ветвящихся капиллярных системах с капиллярами разного диаметра.

Теоретическая модель. Допустим, что имеется система, состоящая из трех капилляров разного радиуса, один из которых вертикален и погружен в воду, а остальные два наклонены под углами β_{1np}^1 и $\beta_{1лв}^1$ к горизонтали, как показано на рис. 1, а. Примем, что радиус вертикального капилляра

$$n \geq r_2 + r_3, r_2 = nr_3. \quad (1)$$

Учитывая, что сила поверхностного натяжения воды F_n в мениске капилляра

$$F_n = 2\pi r \sigma \cos \alpha \quad (2)$$

прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения воды σ , косинусу угла смачивания α и радиусу капилляра r [12], определим какую долю вносит каждый из наклонных капилляров в подъем воды в вертикальном капилляре. Равнодействующая сил, обеспечивающая подъем воды в вертикальном капилляре, пропорциональна сумме радиусов наклонных капилляров:

$$r_2 + r_3 = nr_3 + r_3 = (n+1)r_3. \quad (3)$$

Можно считать, что правый капилляр поднимает $1/(n+1)$ часть воды в вертикальном капилляре, а левый $n/(n+1)$ часть воды. Обозначим высоту вертикального капилляра через h . Величины продвижения и высоты подъема воды в правой и левой ветвях обозначим соответственно через $L_{1np}^1, L_{1лв}^1, h_{1np}^{(1)}, h_{1лв}^{(1)}$.

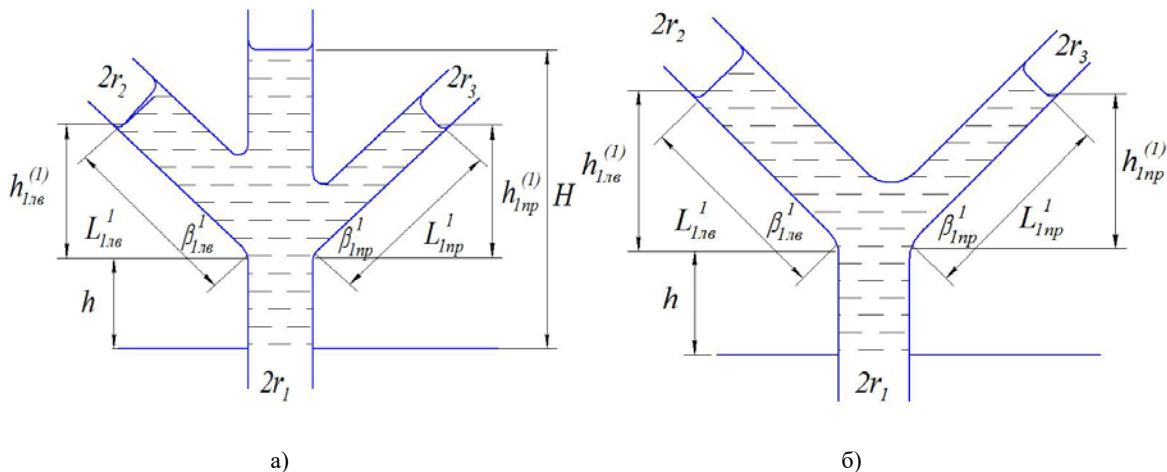


Рис. 1. Модели капиллярных систем с капиллярами разного диаметра

Учитывая эти соотношения и полагая в (2) $\alpha = 0$, уравнения продвижения воды в капиллярах правой и левой ветвей могут быть записаны в виде:

$$\frac{1}{n+1} \pi r_1^2 \rho g h + \pi r_3^2 \rho g L_{1np}^1 \sin \beta_{1np}^1 = 2 \pi r_3 \sigma, \quad (4)$$

$$\frac{n}{n+1} \pi r_1^2 \rho g h + \pi n^2 r_3^2 \rho g L_{1лв}^1 \sin \beta_{1лв}^1 = 2 \pi n r_3 \sigma. \quad (5)$$

Сокращая обе части уравнений (4) и (5) на $\pi r_3^2 \rho g$ получим:

$$L_{1np}^1 \sin \beta_{1np}^1 = h_3 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h = h_{1np}^1, \quad (6)$$

$$L_{1лв}^1 \sin \beta_{1лв}^1 = \frac{1}{n} \left(h_3 - \frac{1}{(n+1)} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h \right) = h_{1лв}^1, \quad (7)$$

где h_3 — высота подъема воды в одиночном вертикальном капилляре радиуса r_3 .

Из (6) и (7) следует, что высота подъема воды в левом капилляре большего радиуса в n раз меньше, чем в правом, а разность высот подъема составляет

$$h_{1np}^1 - h_{1лв}^1 = h_3 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h - \frac{1}{n} h_3 + \frac{1}{n(n+1)} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h = \frac{(n-1)}{n} \left(h_3 - \frac{1}{n+1} h \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) \right). \quad (8)$$

Таким образом, разность высот подъема воды в наклонных ветвях не зависит от угла наклона ветвей, а зависит только от соотношения радиусов капилляров.

При $n=1$, $r_2=r_3$, $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1 = 0$, $\beta_{1np}^1 = \beta_{1лв}^1$, $h_{1np}^1 = h_{1лв}^1 = h_3 - \frac{1}{2} h$, что полностью совпадает с результатами, полученными в [1].

Из соотношений (6) и (7) можно также видеть, что продвижение воды в левой и правой ветви при $n \neq 1$ не одинаково. В частности, из (7) следует, что продвижение воды и в левом капилляре большего радиуса при условии $\beta_{1np}^1 = \beta_{1лв}^1$ в n раз меньше, чем в правом. При $\beta_{1np}^1 = \beta_{1лв}^1 = 0$ наклонные ветви располагаются горизонтально. В случае, когда $\beta_{1np}^1 = \beta_{1лв}^1 = 90^\circ$, наклонные ветви принимают вертикальное положение, а разность высот подъема воды в них определяется соотношением (7). Отношение

$$L_{1np}^1 / L_{1лв}^1 = n \frac{\sin \beta_{1np}^1}{\sin \beta_{1лв}^1} \quad (9)$$

показывает, что продвижение в наклонных капиллярах зависит от соотношения как радиусов, так и углов наклона к горизонтали.

Полагая в (6) или (7) $h_{1np}^1 = h_{1лв}^1 = 0$, можно определить критическую высоту h_{kp} при которой вода из вертикального капилляра не будет поступать в наклонные ни при каких условиях:

$$h_3 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h = 0, \quad (10)$$

$$h_3 = \frac{1}{n+1} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h \rightarrow h = h_{kp} = h_3 (n+1) \left(\frac{r_3^2}{r_1^2} \right).$$

В модели на рис. 1, б подъем воды происходит под действием сил поверхностного натяжения в менисках трех капилляров, имеющих разные радиусы. Как и в предыдущем случае, выполняется условие (1), а соотношение радиуса вертикального капилляра с меньшим из боковых капилляров равно $r_1 = m r_3$. Тогда правый боковой капилляр поднимает в общей части вертикального капилляра на высоту h только $\frac{1}{m+n+1}$ часть объема воды, левый боковой капилляр $\frac{n}{m+n+1}$, а вертикальный — остальную часть объема воды, пропорциональную $\frac{m}{m+n+1}$.

В этом случае уравнения, описывающие продвижение воды в боковых капиллярах и высоту ее подъема H в вертикальном капилляре запишутся следующим образом:

$$\frac{1}{m+n+1} \pi r_1^2 \rho g h + \pi r_3^2 \rho g L_{1np}^1 \sin \beta_{1np}^1 = 2 \pi r_3 \sigma, \quad (11)$$

$$\frac{n}{m+n+1} \pi r_1^2 \rho g h + \pi r_2^2 \rho g L_{1лв}^1 \sin \beta_{1лв}^1 = 2 \pi r_2 \sigma, \quad (12)$$

$$\frac{m}{m+n+1}\pi r_1^2 \rho g h + (H-h)\pi r_1^2 \rho g = 2\pi r_1 \sigma. \quad (13)$$

Сокращая (11), (12) и (13) соответственно на $\pi r_3^2 \rho g$, $\pi r_2^2 \rho g$ и $\pi r_1^2 \rho g$ получим выражения для L_{1np}^1 , $L_{1лв}^1$ и H :

$$L_{1np}^1 \sin \beta_{1np}^1 = h_3 - \frac{1}{m+n+1} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} \right) h = h_{1np}^1, \quad (14)$$

$$L_{1лв}^1 \sin \beta_{1лв}^1 = h_2 - \frac{n}{m+n+1} \left(\frac{r_1^2}{r_2^2} \right) h = h_{1лв}^1, \quad (15)$$

$$H = h_1 + \left(1 - \frac{n}{m+n+1} \right) h. \quad (16)$$

Из (14)–(16) следует, что с увеличением m и n (что эквивалентно уменьшению r_3) порознь или одновременно величины L_{1np}^1 , $L_{1лв}^1$, h_{1np}^1 , $h_{1лв}^1$ и H уменьшаются. Высота подъема воды при этом в капилляре малого радиуса увеличивается, так как высота подъема воды в одиночном капилляре h_3 обратно пропорциональна радиусу капилляра r_3 , а коэффициент перед вторым слагаемым в (14) пропорционален первым степеням m и n . При $m=n=1$ уравнения (14)–(16) совпадают с аналогичными уравнениями в [9] и описывают распределение воды в аналогичной системе с капиллярами равных радиусов. Высота подъема воды в вертикальном капилляре не зависит от угла наклона ветвей, а зависит только от соотношения радиусов капилляров. При этом величина $h_{кр}$ определится для правой и левой ветвей соотношениями:

$$h_{крпр} = (m+n+1) \left(\frac{r_3^2}{r_1^2} \right) h_3, \quad (17)$$

$$h_{крлв} = \frac{m+n+1}{n} \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} \right) h_2. \quad (18)$$

Физический смысл соотношений (17) и (18) состоит в том, что изменение радиуса любого из капилляров приводит к перераспределению действующих сил и при определенном соотношении размеров капилляров действующие в системе силы не обеспечивают подъем воды выше h . Нетрудно видеть, что $h_{крпр} = h_{крлв}$. Учитывая [1], что $h_2 = 2\sigma \cos \alpha / r_2 \rho g$ и условие $r_2 = nr_3$ получим $h_2 = 2\sigma \cos \alpha / nr_3 \rho g$, откуда $h_2 = h_3/n$. Подставляя последнее соотношения в (18) получим:

$$h = h_{крлв} = \frac{m+n+1}{n} n^2 \left(\frac{r_3^2}{r_1^2} \right) \frac{h_3}{n} = (m+n+1) \left(\frac{r_3^2}{r_1^2} \right) h_3 = h_{крпр}. \quad (19)$$

Разность высот подъема воды в боковых ветвях описывается соотношением

$$h_{1np}^1 - h_{1лв}^1 = h_3 - h_2 + \frac{r_1^2}{m+n+1} \left(\frac{n}{r_2^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) h \quad (20)$$

и при $m=n=1$ становится равной нулю.

Анализ уравнений (17), (18) и (20) затруднителен из-за большой варибельности соотношений величин m , n и h . Однако, построив графическое 3D изображение этих уравнений, можно получить представление о изменении разности высот подъема воды в ветвях и о изменении $h_{кр}$ в широком диапазоне изменения величин m , n и h . Разделив обе части (17) на h_3 и учитывая, что $r_1 = mr_3$, получим:

$$\frac{h_{крпр}}{h_3} = \frac{m+n+1}{m^2}. \quad (21)$$

Результаты построения графиков для $h_{кр}$, с учетом (1), представлены на рис. 2.

Выбор h_3 в качестве нормирующей величины обусловлен следующими соображениями. Правый капилляр имеет наименьший радиус r_3 и, следовательно, высота подъема воды в одиночном вертикальном капилляре этого радиуса будет наибольшей по сравнению с капиллярами радиусов r_1 и r_2 [9]. Поэтому диапазон отношений $h_{крпр} / h_3$ будет находиться в пределах от 0 до 1 и может быть однозначно задан при построении 3D графиков.

Анализ графиков на рис. 2 позволяет выяснить, как изменяется величина $h_{кр}$ при изменении соотношения радиусов капилляров. Так, например, на рис. 2, а $m=3$, n изменяется от 1 до 2, а величина $h_{кр}$ находится в пределах $\approx 0,55 - 0,75h_3$. Увеличение радиуса вертикального капилляра приводит к уменьшению $h_{кр}$ и при $m=10$ $h_{кр} \approx 0,17h_3$.

Увеличение радиуса левого капилляра до n от 1 до 4 при $m=5$ (рис. 2, в) и выполнении условия (1) приводит к уменьшению критической высоты, которая в этом случае находится в пределах $\approx 0,24 - 0,4 h_3$. С увеличением радиуса вертикального капилляра $h_{кр}$ уменьшается и при $m=10$, $h_{кр} \approx 0,15h_3$.

В случае, представленном на рис. 2, б, радиус r_1 больше радиуса r_3 в 10–20 раз, а r_2 может быть равен r_3 или превышать его до 9 раз. При этом соотношение $r_1/r_2=m/n$. Можно видеть, что при $m=10$ и изменении n от 1 до 9 величина $h_{кр}$ находится в пределах $\approx 0,17-0,2h_3$, уменьшаясь при увеличении m до 20 до значения $h_{кр} \approx 0,13h_3$.

Общей закономерностью в рассмотренных случаях является то, что $h_{кр}$ тем больше, чем меньше разница в радиусах вертикального и боковых капилляров. С увеличением разницы в радиусах $h_{кр}$ уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю. Физическая интерпретация полученных результатов состоит в следующем. С увеличением h (рис. 1, б) или r_1 одновременно происходит несколько процессов. Вес воды в его нижней части высотой h увеличивается пропорционально r_1^2 , а F_n пропорциональна r_1 , вследствие чего уменьшается высота подъема воды [9].

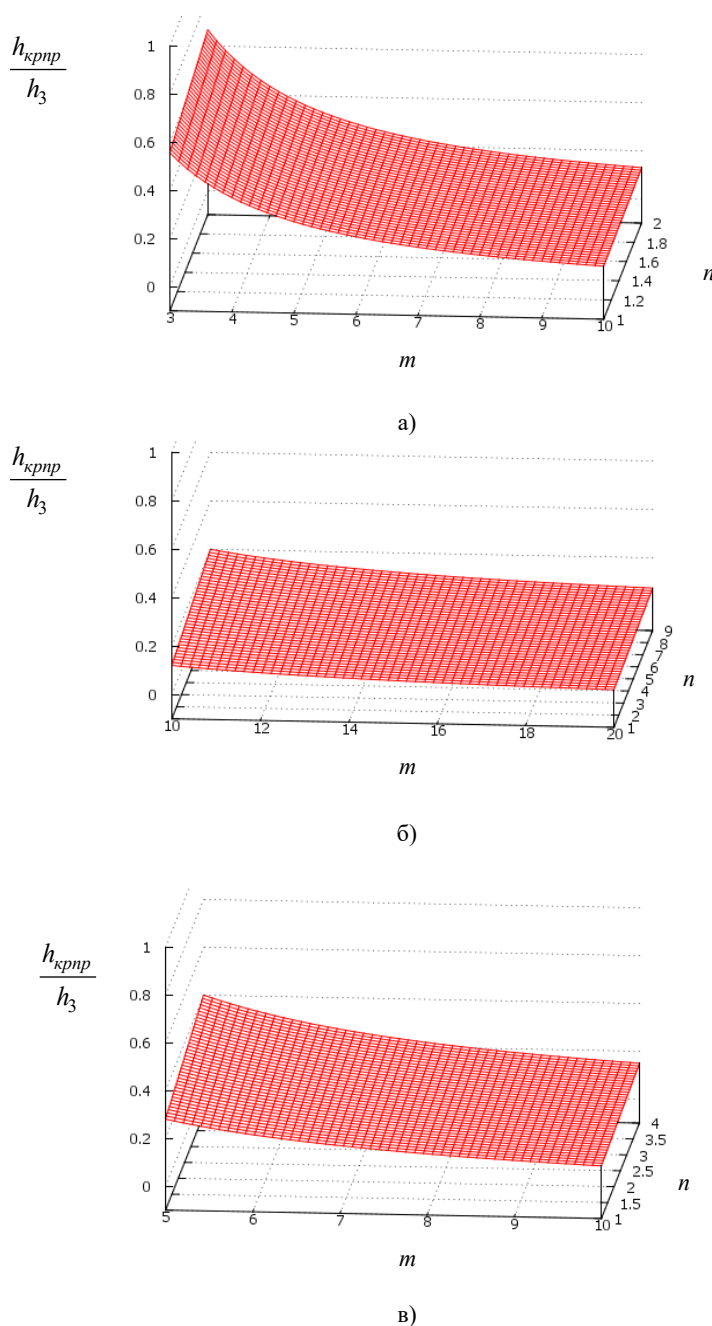


Рис. 2. Зависимость $h_{крпр}/h_3$ от соотношения m и n в диапазонах изменения:
а) m от 3 до 10, n от 1 до 2; б) m от 10 до 20, n от 1 до 9; в) m от 5 до 10, n от 1 до 4

воды в боковые капилляры. И при достижении какого-то значения r_1 или h вода в боковые капилляры поступать не будет ($h_{кр}$).

Соотношение (20), описывающее разность высот подъема воды в боковых капиллярах, можно также представить в 3D графике. Выражая r_1 и r_2 через r_3 , учитывая, что $h_2 = h_3/n$ и нормируя по h_3 , получим следующее соотношение:

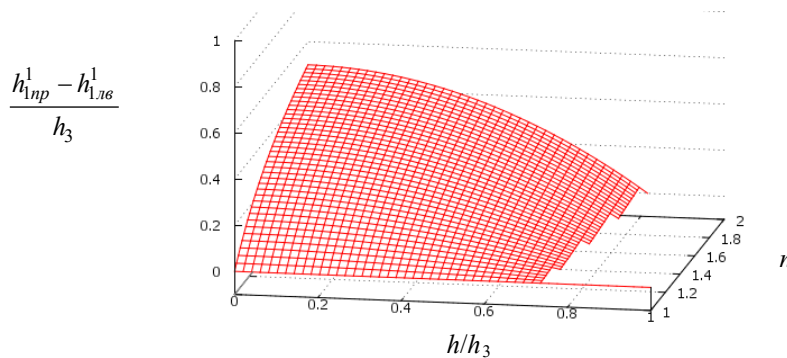
$$\frac{h_{1np}^1 - h_{1лв}^1}{h_3} = 1 - \frac{1}{n} + \frac{m^2}{m+n+1} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \delta, \quad (22)$$

где $\delta = h/h_3$. Выражение (22) содержит 3 переменных: m , n и δ . Поскольку (22) нормировано по h_3 , то $(h_{1np}^1 - h_{1лв}^1)/h_3$ и δ изменяются в пределах от 0 до 1. Задавая теперь один из параметров постоянным, например, m , можно построить любую серию 3D графиков для (22). Некоторые из них представлены на рис. 3.

Анализ этих графиков показывает следующее. Если r_1 не сильно превышает r_2 и r_3 (рис. 3, а), то при $\delta=0$ и $h=0$ величина $(h_{1np}^1 - h_{1лв}^1)$ изменяется от $0,5h_3$ (при $n=2$) до 0 (при $n=1$). Физическая интерпретация этого заключается в том, что при $n=1$, $r_2 = r_3$ каждый из трех капилляров оказывается независимо от остальных погруженным в источник воды и ее подъем в них определяется также, как и для одиночного погруженного в воду капилляра. При $\delta=0$ ($h=0$) и $n=2$, $r_2 = 2r_3$ объем поднимаемой воды увеличивается и $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1 = 0,5h_3$. По мере увеличения h и n (одновременно или порознь) разность $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1$ уменьшается, так как F_n в обоих боковых капиллярах частично и пропорционально радиусу расходуется на подъем воды на высоту h в вертикальном капилляре. При достижении $\delta \approx 0,7$ ($h \approx 0,7h_3$) выражение $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1$ становится равным нулю, так как величина h становится равной $h_{кр}$ и вода в боковые капилляры не подступает.

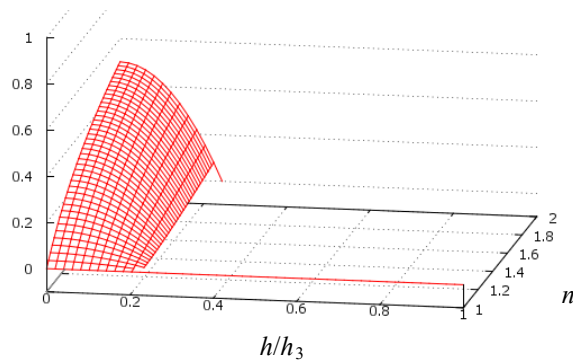
Если r_1 увеличивается до $m=10$ (рис. 3, б) и $1 \leq n \leq 2$, то все приведенные выше рассуждения сохраняются. Но $h_{кр}$ уменьшается и становится равной $\approx 0,2h_3$, что связано с перераспределением сил в системе из-за необходимости подъема увеличившегося объема воды высотой h . Справедливость этого вывода проиллюстрирована на рис. 3, в. Если $m=10$, а $1 \leq n \leq 9$, то при $n=1$ и $\delta=0$ по причинам, указанным выше, разность $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1 = 0$. По мере роста n разность высот подъема воды в правом и левом капилляре увеличивается и достигает $0,9h_3$ при $n=9$, то есть в правом капилляре вода поднимается в 9 раз выше, чем в левом, что вполне справедливо для одиночных погруженных в воду капилляров. По мере увеличения δ выражение $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1$ уменьшается до нуля при величине h в диапазоне $0,3h_3 - 0,4h_3$, который является критическим. Сравнивая эти критические величины с таковыми на рис. 3, а и рис. 3, б можно видеть, что $h_{кр}$ (рис. 3, в) находится в промежутке между величинами $h_{кр}$ на рис. 3, а и б.

Графики для других соотношений величин m и n , продемонстрированных на рис. 3, г и рис. 3, д, проявляют ту же тенденцию изменения $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1$, как описано выше. Различие состоит только в скорости изменения $h_{1np}^1 - h_{1лв}^1$ и достижения $h_{кр}$.

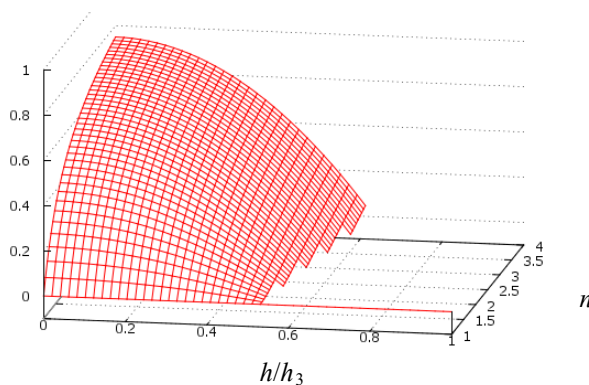


а) для $m=3$, $n=1-2$

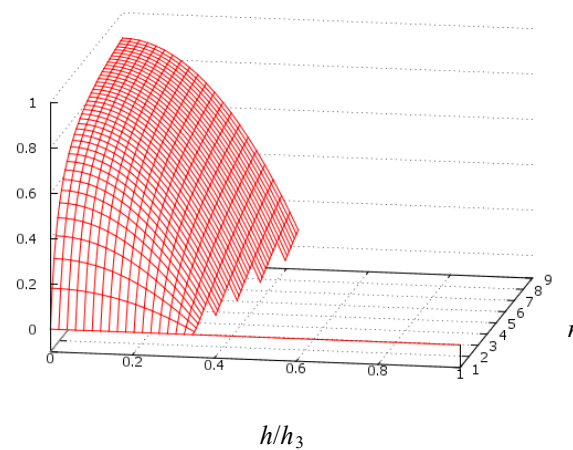
$$\frac{h_{np}^1 - h_{1\lambda}^1}{h_3}$$

б) для $m=10, n=1-2$

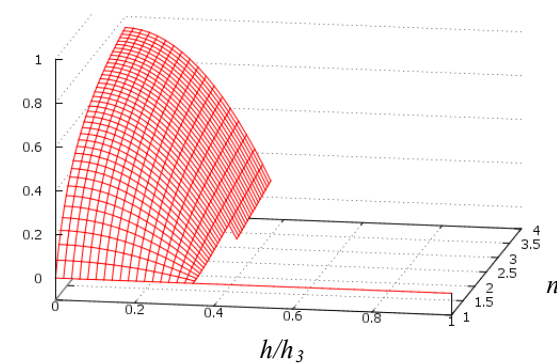
$$\frac{h_{np}^1 - h_{1\lambda}^1}{h_3}$$

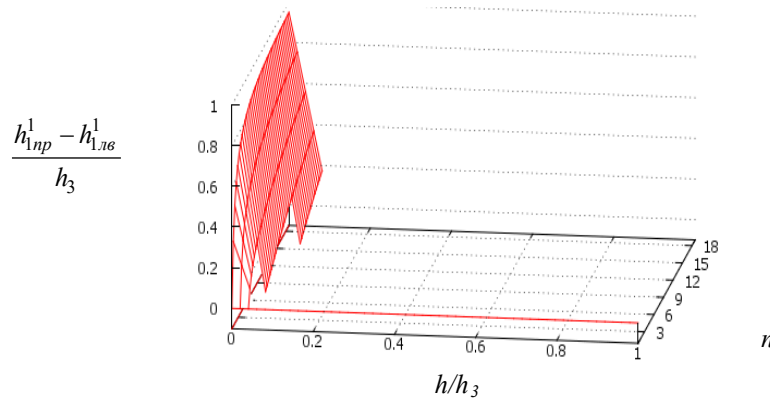
в) для $m=10, n=1-9$

$$\frac{h_{np}^1 - h_{1\lambda}^1}{h_3}$$

г) для $m=5, n=1-4$

$$\frac{h_{np}^1 - h_{1\lambda}^1}{h_3}$$

д) для $m=10, n=1-4$



е) для $m=20, n=1-19$

Рис. 3. Зависимость $\frac{h_{1np}^1 - h_{1лв}^1}{h_3}$ от соотношения параметров m, n и δ при фиксированных значениях m .

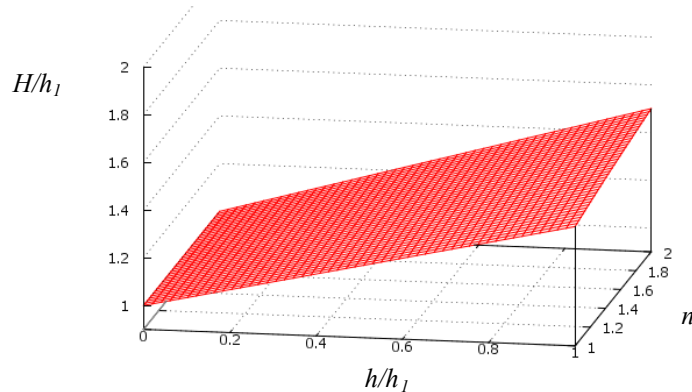
Величины m и диапазон изменения n указаны в подписочных надписях

Более наглядно это можно видеть на рис. 3, е, где $m=20$, а $1 \leq n \leq 19$. Видно, что при увеличении n от 1 до 19 разность высот изменяется при $n=1$ и $\delta=0$ от 0 до $\approx 0,95h_3$ и по мере увеличения δ уменьшается до нуля при $h_{кр}$ в диапазоне $0,2h_3-0,3h_3$.

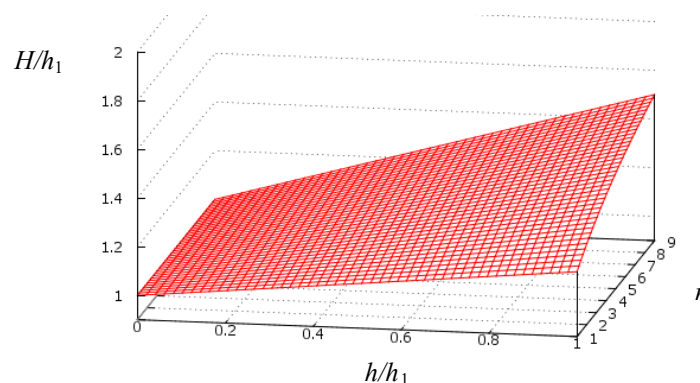
Применяя описанную выше методику к (16), получим соотношение для построения в 3D графике величины H/h_1 в виде

$$H/h_1 = 1 + (1 - m/(m+n+1))\delta_H, \quad (23)$$

где $\delta_H = h/h_1$; h_1 — высота подъема воды в одиночном вертикальном капилляре радиуса r_1 . Нормирование по h_1 обусловлено следующим. В [9] показано, что наличие боковых капилляров в ветвящейся системе приводит к увеличению подъема воды в связанном с ними вертикальном капилляре. Поэтому $H/h_1 \geq 1$, в то время как $0 \leq \delta_H = h/h_1 \leq 1$.



а) для $m=3, n=1-2$



б) для $m=10, n=1-9$

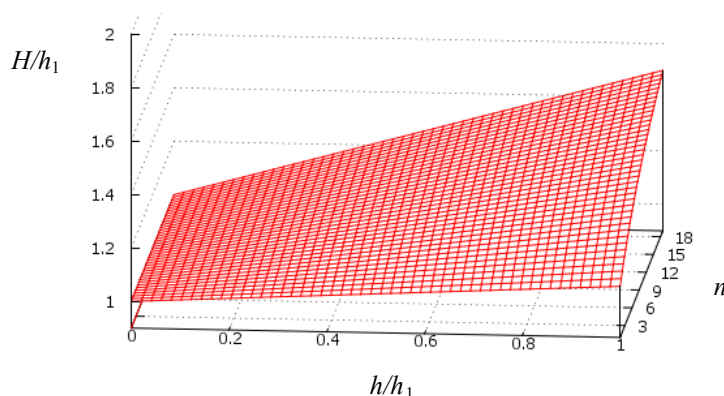
в) для $m=20$, $n=1-19$

Рис. 4. Зависимость H/h_1 от соотношения параметров m , n и δ_H при фиксированных значениях m . Величины m и диапазон изменения n указаны в подрисовочных надписях

Результаты построения графиков для H/h_1 , при различных значениях m , n и δ_H , представлены на рис. 4. Из рис. 4 а, б, в следует, что при любом соотношении параметров m , n и $\delta_H=0$, $H=h_1$, то есть вода поднимается как в одиночном вертикальном капилляре радиуса r_1 . Если радиусы вертикального и боковых капилляров отличаются несущественно (рис. 4, а), то высота подъема воды в вертикальном капилляре по мере увеличения δ_H увеличивается и при достижении $\delta_H=1$, в зависимости от n , $H \approx 1,3h_1 - 1,5 h_1$. Физически это означает, что наличие боковых капилляров позволяет воде подняться на высоту, превышающую h_1 в 1,3 раза. При увеличении m , n , как показано на рис. 4, б при $m=10$, величина подъема воды зависит от величины n . Так при $n=1$, $H \approx 1,17$ и при $n=9$ достигает значения $H \approx 1,5$. Физический смысл этого заключается в том, что по мере роста n (при $m=\text{const}$), боковые капилляры берут на себя все больше «работы» по подъему воды в вертикальном капилляре, позволяя силе поверхностного натяжения в нем поднимать воду на большую высоту. Если $m=20$ (рис. 4, в) и $n=1$, $H \approx 1,09$, а при $n=19$, $H \approx 1,5$. Таким образом, при $n=1$ величина H уменьшается, а при дальнейшем росте m , n увеличивается, асимптотически приближаясь к $H=2$.

Аналогичным образом можно построить 3D графики для h_{1np}^1, h_{1lv}^1 и, задавая величины углов $\beta_{1lv}^1, \beta_{1np}^1$, для L_{1np}^1, L_{1lv}^1 .

Выводы.

1. Построена модель подъема воды в капиллярной системе с цилиндрическими капиллярами разного радиуса. Вследствие большого количества переменных и их высокой вариабельности для анализа полученных соотношений авторы воспользовались 3D графикой.

2. Показано, что изменение параметров капиллярной системы приводит к перераспределению действующих в ней сил и разность высот подъема воды в боковых капиллярах может изменяться от 0 до 0,95 высоты подъема воды одиночного вертикального капилляра системы, имеющего наименьший радиус.

3. Установлено, что при определенных соотношениях параметров капиллярной системы существует критическая высота, при которой вода в боковые капилляры не поступает. С увеличением разницы в радиусах вертикального и боковых капилляров или увеличением высоты части вертикального капилляра, на которую действуют силы поверхностного натяжения, критическая высота уменьшается.

4. Высота подъема воды в вертикальном капилляре зависит от соотношения радиусов вертикального и боковых капилляров, а также от высоты части вертикального капилляра, предшествующей разветвлению. Если величина последней равна нулю, то подъем воды в вертикальном капилляре не зависит от наличия боковых капилляров. Увеличение радиусов боковых капилляров при наличии общей части вертикального капилляра и при постоянстве его радиуса приводит к повышению уровня воды. Это связано с уменьшением разницы в радиусах боковых и вертикального капилляров. Боковые капилляры принимают все большее участие (пропорциональное их радиусам) в подъеме воды в общей вертикальной части. При этом высота подъема воды в вертикальном капилляре в рассматриваемой модели может до 2-х раз превышать высоту подъема воды в одиночном вертикальном капилляре того же радиуса.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. В. Физиология растений / В. В. Кузнецов, Г. А. Дмитриева. — Москва : Высшая школа, 2006. — 742 с.
2. Zeiger, T. Plant Physiology / T. Zeiger, E. Lond. 2002, 3rd Edition, Sinauer Associated, Inc. Sunderland, MA, 690 pp.
3. Тимонин, А. К. Ботаника : Высшие растения / А. К. Тимонин. — Москва : Издательский центр «Академия», 2007. — 352 с.
4. Myburg, A. A. Xylem Structure and Function. Encyclopedia of life science / A. A. Myburg, R. Sederoff. — Nature, Publishing Group, 2001. — pp. 1–9.
5. Ботаника / П. Зитте [и др.]; пер. с немецкого. — Москва : Издательский центр «Академия», 2008. — 367 с.
6. Pfautsch, S. Phloem as Capacitor: Radial Transfer of Water into Xylem of Trees Stems Occurs via Symplastic Transport in Ray Parenchyma / S. Pfautsch, J. Renard, M. G. Tjoelker, A. Salih / Plant Physiology, March 2015. — vol. 167, № 3. — pp. 963–971.
7. Borghetty, M. Water transport in plant under climatic stress / M. Borghetty, J. Grace, A. Raschi / Cambridge University Press, Cambridge, 1993. — pp. 300.
8. Harvay, B. R. The theory of the rise of sap in trees: Some historical and conceptual remarks / B. R. Harvay. Physics in Perspective, 15 (2013). — pp. 320–358.
9. Вернигоров, Ю. М. Математическое моделирование распределения жидкости в ветвящихся капиллярных системах / Ю. М. Вернигоров, И. А. Кипнис // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 8 (51). — С. 1195–1206.
10. Кипнис, И. А. Механизм продвижения воды в капиллярах ксилемы растений / И. А. Кипнис, Ю. М. Вернигоров / Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 3 (78). — С. 78–88.
11. Кипнис, И. А. Математическая модель подъема воды в простых криволинейных капиллярах / И. А. Кипнис, Ю. М. Вернигоров / Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 5/6 (74). — С. 110–120.
12. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — Москва : Наука, 1968. — 940 с.

References

1. Kuznetsov, V.V., Dmitrieva, G.A. Fiziologiya rasteniy. [Plant physiology.] Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 742 p. (in Russian).
2. Zeiger, T., Lond, E. Plant Physiology, 3rd Edition, 2002, Sinauer Associated, Inc. Sunderland, MA, 690 p.
3. Timonin, A.K. Botanika: Vysshie rasteniya. [Botany: Higher plants.] Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2007, 352 p. (in Russian).
4. Myburg, A.A., Sederoff, R. Xylem Structure and Function. Encyclopedia of life science. Nature, Publishing Group, 2001, pp. 1–9.
5. Sitte, P., et al. Botanika. [Botany.]; transl. from German. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2008, 367 p. (in Russian).
6. Pfautsch, S., Renard, J., Tjoelker, M.G., Salih, A. Phloem as Capacitor: Radial Transfer of Water into Xylem of Trees Stems Occurs via Symplastic Transport in Ray Parenchyma. Plant Physiology, March 2015, vol. 167, no. 3, pp. 963–971.
7. Borghetty, M., Grace, J., Raschi, A. Water transport in plant under climatic stress. Cambridge University Press, Cambridge, 1993, 30 p.
8. Harvay, B.R. The theory of the rise of sap in trees: Some historical and conceptual remarks. Physics in Perspective, 2013, vol. 15, iss. 3, pp. 320–358.
9. Vernigorov, Y.M., Kipnis, I.A. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya zhidkosti v vetvyashchikhsya kapillyarnykh sistemakh. [Mathematical modeling of liquid distribution in branch capillary systems.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 8 (51), pp. 1195–1206 (in Russian).
10. Kipnis, I.A., Vernigorov, Y.M. Mekhanizm prodvizheniya vody v kapillyarakh ksilemy rasteniy. [Mechanism of promotion of water in the xylem capillaries plants.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 3 (78), pp. 78–88 (in Russian).
11. Kipnis, I.A., Vernigorov, Y.M. Matematicheskaya model' pod"ema vody v prostykh krivolineynykh kapillyarakh. [Water rise mathematical model in simple curvilinear capillaries.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 5/6 (74), pp. 110–120 (in Russian).
12. Yavorskiy, B.M., Detlaf, A.A. Spravochnik po fizike. [Reference book on Physics.] Moscow: Nauka, 1968, 940 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.02.2015

Сдана в редакцию 18.02.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9:531.3

DOI 10.12737/19699

Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай большой скорости резания)*

В. Л. Заковоротный¹, А. А. Губанова², А. Д. Лукьянов^{3}**^{1,2,3} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Synergetic approach to study forming path stability of the end cutdown milling by side faces (case of high speed cutting)***

V. L. Zakovorotny¹, A. A. Gubanova², A. D. Lukyanov^{3}**^{1,2,3} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является рассмотрение проблемы устойчивости установившихся стационарных траекторий упругих деформационных смещений инструмента при продольном фрезеровании концевыми фрезами. В отличие от ранее рассмотренных проблем устойчивости, в которых анализируется случай медленных движений, для которых в уравнениях в вариациях относительно стационарной траектории параметры системы можно рассматривать замороженными, анализируется случай большой скорости резания. В этом случае при анализе устойчивости необходимо рассматривать линеаризованную систему в вариациях с периодически изменяющимися коэффициентами. По мере увеличения скорости вращения инструмента во многих случаях наблюдается параметрическое самовозбуждение колебаний, поэтому главное внимание уделяется изучению условий параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами. Показано, что на условие параметрического самовозбуждения оказывают влияние как технологические режимы резания, прежде всего частота вращения инструмента, так и геометрия инструмента, которая определяет матрицы угловых коэффициентов ориентации сил резания. Приводятся примеры областей устойчивости в зависимости от изменения параметров системы.

The work objective is to consider the stability problem of steady-state paths of the elastic deformational tool displacement under the longitudinal end milling. The authors analyze the case of high speed cutting in contrast to the previously discussed stability problems that analyze the case of slow movements for which the system parameters can be considered frozen in the equations in variations relative to the stationary path. In this case, the stability analysis must consider the linearized system in variations with periodically varying coefficients. With speeding-up the tool rotation in many cases there is a parametric self-excitation of oscillations. Therefore, the main attention is paid to studying the parametric excitation conditions of a dynamic endmilling system. It is shown that the parametric excitation condition is affected by the technological cutting modes, both the tool rotation frequency and the tool geometry which determines the matrix angular coefficients of the cutting forces orientation. Examples of stability areas depending on changes in the system settings are given.

Ключевые слова: процесс фрезерования концевыми фрезами, стационарные траектории, периодически изменяющиеся параметры, устойчивость, параметрическое самовозбуждение.

Keywords: endmilling process, stationary trajectories, periodically-varying parameters, stability, parametric excitation.

Введение. При изучении динамики процесса резания, в частности, фрезерования, рассматривают упругие подсистемы со стороны режущего инструмента и обрабатываемой детали, которые взаимодействуют между собой через динамическую связь, формируемую процессом обработки [1–9]. В свою очередь, динамическая связь характеризует модель сил резания, представленную в координатах состояния системы и технологических режимах [10, 11]. В

*Работа выполнена по гранту РФФИ №14-08-00206а.

** E-mail: vazakovorotny@dstu.edu.ru, anatoliya81@mail.ru, lex1998@rambler.ru

***The research is done on RFFI grant no.14-08-00206a.

зависимости от модели сил, зависящей от конкретного процесса и условий обработки, анализируются проблемы устойчивости и многообразий, формируемых в окрестностях равновесия. Рассматриваются автоколебания [12, 13], инвариантные торы [14–17] и хаотические аттракторы [16–19]. Показано, что для раскрытия основных свойств упругие деформационные смещения не могут быть скалярными. Из всех процессов наиболее сложным является процесс фрезерования, который является нестационарным с периодически изменяющимися параметрами длины и толщины срезаемого слоя каждым режущим лезвием фрезы [20–41]. Поэтому в подвижной системе координат, движение которой определяется траекториями движения исполнительных элементов, стационарным установившимся состоянием является не точка равновесия, как это имеет место при точении, а некоторая замкнутая траектория. В связи с этим уравнение динамики, в общем случае, имеет периодически изменяющиеся коэффициенты. Ранее был рассмотрен случай «медленных» стационарных траекторий [41], для которых в рассматриваемый момент времени параметры динамической связи можно считать замороженными. Это справедливо для малых скоростей резания и достаточных параметров жесткости инструмента, что является традиционным случаем обработки. Однако по мере увеличения частоты вращения инструмента и (или) уменьшения изгибной жесткости концевой фрезы, частоты собственных колебаний инструмента и его вращения становятся соизмеримыми. В этом случае в динамической системе резания возможно параметрическое самовозбуждение. Свойства системы в этом случае принципиально отличаются от свойств, рассмотренных ранее. Именно этому случаю посвящена данная работа, которая фактически является продолжением статьи, опубликованной ранее [41].

Уравнение в вариациях относительно стационарной траектории. При увеличении частоты вращения шпинделя наступает момент, когда время периодического изменения коэффициентов становится соизмеримым с импульсной реакцией системы. На практике такие условия соответствуют скоростному фрезерованию. В этом случае исходное дифференциальное уравнение несколько упрощается, но его анализ становится более сложным. Во-первых, при высоких скоростях резания запаздыванием вариаций сил по отношению к изменениям колебательных смещений инструмента относительно заготовки можно пренебречь, во-вторых, для анализа устойчивости при построении уравнения в вариациях относительно стационарной траектории необходимо учитывать, что параметры системы становятся функциями времени. В этом случае необходимо учитывать параметрическое самовозбуждение системы. Параметрические явления наступают и в том случае, если фреза обладает малой изгибной жесткостью. Исходное уравнение динамики в этом случае, в отличие от рассмотренного в [41], имеет следующий вид (рис.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 X_1}{dt^2} + h \frac{dX_1}{dt} + cX_1 = \\ = \chi_1 \rho_0 [1 + \mu \exp(-\alpha_1 (V - \frac{dX_2}{dt}))] \cdot b \cdot [a_k(t) - X_1] + \chi_1^{(1)} F^{(0)} \cdot \exp[-\alpha_2 dX_1 / dt]; \\ m \frac{d^2 X_2}{dt^2} + h \frac{dX_2}{dt} + cX_2 = \\ = \chi_2 \rho_0 [1 + \mu \exp(-\alpha_1 (V - \frac{dX_2}{dt}))] \cdot b \cdot [a_k(t) - X_1] + \chi_2^{(1)} F^{(0)} \cdot \exp[-\alpha_2 dX_1 / dt], \end{array} \right. \quad (1)$$

где X_1, X_2 — упругие деформационные смещения инструмента в плоскости, нормальной к оси его вращения в системе координат, привязанной к вершине режущего зуба; m, h, c — инерционные, диссипативные и упругие коэффициенты, равные между собой, так как концевая фреза обладает свойством симметрии геометрических параметров; b — ширина срезаемого слоя зубом фрезы; ρ_0 — давление стружки на переднюю поверхность режущего лезвия зуба фрезы; $a_k(t)$ — заданная функция кинематической составляющей вариации толщины срезаемого слоя; $\chi_1, \chi_2, \chi_1^{(1)}, \chi_2^{(1)}$ — угловые коэффициенты ориентации главной составляющей силы резания и силы, формируемой в области контакта задней грани инструмента с заготовкой; α_1, α_2 — параметры скоростной зависимости сил; $F^{(0)}$ — значение силы, формируемой в области задней грани инструмента при скорости движения инструмента в сторону заготовки без учета скоростей упругих деформационных смещений.

На приведенной иллюстрации справа жирной линией показана функция изменения кинематической толщины срезаемого слоя $a_k(\phi)$, то есть его изменения без учета упругих деформационных смещений инструмента. Там же дана пунктиром функция изменения толщины срезаемого слоя с учетом упругих деформационных смещений для установившегося состояния $a(\phi)$.

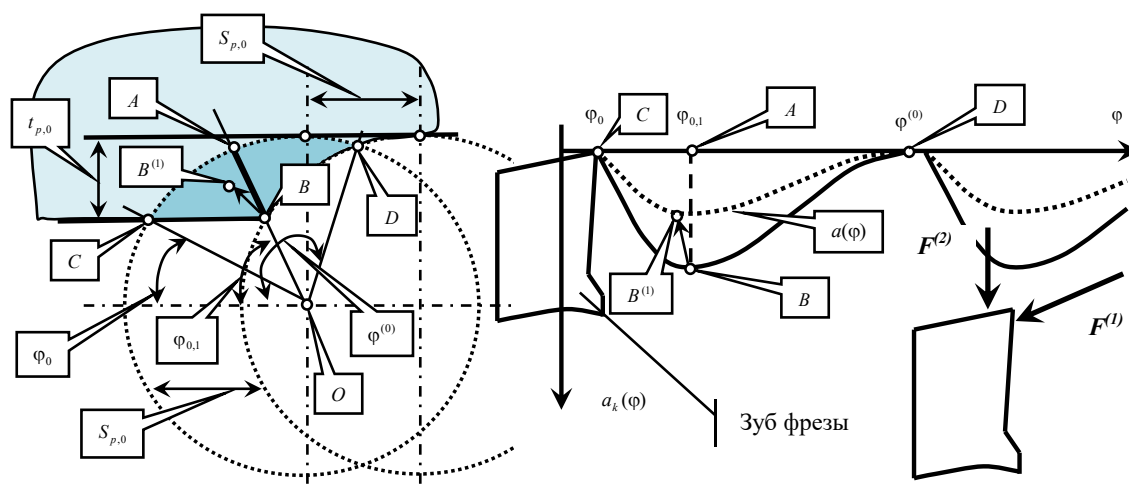


Рис. 1. Схема формирования сил и толщины срезаемого слоя в зависимости от угла поворота фрезы

В системе (1) модуль главной составляющей силы определяется выражением: $F^{(1)}(t) = \rho_0 [1 + \mu \exp(-\alpha_1 (V - \frac{dX_2}{dt}))] \cdot b \cdot [a_k(t) - X_1]$. Модуль силы, действующей на заднюю грань — $F^{(2)} = F^{(0)} \cdot \exp[-\alpha_2 dX_1 / dt]$. При построении уравнения (1) принято также, что частота вращения инструмента является постоянной $\Omega = const$. Поэтому угол поворота инструмента ϕ отличается от времени коэффициентом. Пусть задана стационарная установившаяся траектория деформационных смещений инструмента $X^* = \{X_1^*, X_2^*\}^T$. Она вычисляется по методике, изложенной в [41]. Тогда функции $a_k(t)$, $X^*(t)$, dX^* / dt являются заданными.

Для рассмотрения устойчивости траекторий $X^* = \{X_1^*, X_2^*\}^T$ необходимо исследовать уравнение в вариациях относительно этих траекторий [42]. Представим деформационные смещения в виде $X_1 = X_1^*(t) + x_1(t)$ и $X_2 = X_2^*(t) + x_2(t)$. Здесь $x_1(t)$, $x_2(t)$ малые вариации упругих деформационных смещений относительно траекторий $X_1^*(t)$, $X_2^*(t)$. В свою очередь, функции $X_1^*(t)$, $X_2^*(t)$ — есть установившиеся стационарные траектории. Следовательно, для скоростей упругих деформационных смещений справедливо

$$\frac{dX_1}{dt} = V_1(t) + \frac{dx_1}{dt}, \quad \frac{dX_2}{dt} = V_2(t) + \frac{dx_2}{dt}, \quad (2)$$

где $V_1(t)$, $V_2(t)$ — заданные скорости деформационных смещений для стационарных установившихся движений; $\frac{dx_1}{dt}$, $\frac{dx_2}{dt}$ — их вариации. Таким образом, подлежащее анализу при изучении устойчивости линеаризованное уравнение в вариациях можно представить в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_0 \frac{dx}{dt} + c_0 x = 0, \quad (3)$$

где $m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$; $h_0 = \begin{bmatrix} h + h_{1,1}(t) & -h_{2,1}(t) \\ h_{1,2}(t) & h - h_{2,2}(t) \end{bmatrix}$; $c_0 = \begin{bmatrix} c + c_{1,1}(t) & 0 \\ c_{1,2}(t) & c \end{bmatrix}$;

$h_{1,1}(t) = \chi_1^{(1)} F^{(0)} \alpha_2 \exp[-\alpha_2 V_{1,\Sigma}(t)]$; $h_{1,2}(t) = \chi_2^{(1)} F^{(0)} \alpha_2 \exp[-\alpha_2 V_{1,\Sigma}(t)]$; $h_{2,1}(t) = \chi_1 \rho_0 \alpha_1 a_\Sigma(t) \exp[-\alpha_1 V_{2,\Sigma}(t)]$; $h_{2,2}(t) = \chi_2 \rho_0 \alpha_1 a_\Sigma(t) \exp[-\alpha_1 V_{2,\Sigma}(t)]$; $c_{1,1}(t) = \chi_1 \rho_0 \{1 + \mu \exp[-\alpha_1 V_{2,\Sigma}(t)]\}$; $c_{1,2}(t) = \chi_2 \rho_0 \{1 + \mu \exp[-\alpha_1 V_{2,\Sigma}(t)]\}$; $a_\Sigma(t) = a_k(t) - X_1^*(t)$; $V_{2,\Sigma}(t) = V - V_2(t)$; $V_{1,\Sigma}(t) = V^{(II)} - V_2(t)$, $V^{(II)}$ — постоянная скорость подачи. В уравнении (3) отброшены члены второго порядка малости. Проанализируем переменные коэффициенты в (3). Коэффициенты $h_{1,1}(t)$, $h_{2,1}(t)$, $h_{1,2}(t)$, $h_{2,2}(t)$, $c_{1,1}(t)$, $c_{1,2}(t)$ состоят из постоянной и периодически изменяющейся составляющих. Их период T_0 один и тот же. Период не меняется и в мультипликативных формах $h_{1,2}(t)$, $h_{2,2}(t)$, так как $a_\Sigma(t) > 0$, $\exp[-\alpha_1 V_{2,\Sigma}(t)] > 0$. Поэтому их можно разложить в ряд Фурье, в котором присутствуют постоянная составляющая и только синус-преобразование. Ряд достаточно быстро сходится, поэтому все коэффициенты можно

представить в виде постоянных и периодически изменяющихся коэффициентов, имеющих лишь коэффициенты при синусах. Таким образом, базовое уравнение, подлежащее анализу, имеет структуру

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_0(t) \frac{dx}{dt} + c_0(t)x = 0, \quad (4)$$

$$\text{где } m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}; h_0(t) = \begin{bmatrix} h + \chi_1^{(1)} h^{(1)} [1 + \delta^{(1)} \sin(\Omega t)] & -\chi_1 h^{(2)} [1 + \delta^{(2)} \sin(\Omega t)] \\ \chi_2^{(1)} h^{(1)} [1 + \delta^{(1)} \sin(\Omega t)] & h - \chi_2 h^{(2)} [1 + \delta^{(2)} \sin(\Omega t)] \end{bmatrix}; c_0(t) = \begin{bmatrix} c + \chi_1 c^{(1)} [1 + \delta \sin(\Omega t)] & 0 \\ \chi_2 c^{(1)} [1 + \delta \sin(\Omega t)] & c \end{bmatrix}.$$

Анализ условий параметрического самовозбуждения. Вначале рассмотрим несколько частных случаев. Во-первых, при больших задних углах режущих лезвий фрезы силами, действующими на заднюю грань инструмента, можно пренебречь, то есть $F^{(0)} = 0$. Тогда из (3) имеем $h_{1,1}(t) = h_{1,2}(t) = 0$. Во-вторых, коэффициенты χ_1, χ_2 принципиально зависят от переднего угла зуба фрезы. Рассмотрим два предельных случая. Первый случай $\chi_1 = 1, \chi_2 = 0$. Второй случай $\chi_1 = 0, \chi_2 = 1$. В первом случае с учетом $F^{(0)} = 0$ уравнение (4) преобразуется к виду

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_0(t) \frac{dx}{dt} + c_0(t)x = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}; h_0(t) = \begin{bmatrix} h & -h^{(2)} [1 + \delta^{(2)} \sin(\Omega t)] \\ 0 & h \end{bmatrix}; c_0(t) = \begin{bmatrix} c + c^{(1)} [1 + \delta \sin(\Omega t)] & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix}.$$

В системе (5) второе уравнение не имеет координаты x_1 , и оно характеризует асимптотически устойчивую систему для x_2 . Поэтому $x_2(t)_{npu: t \rightarrow \infty} \Rightarrow 0$, а траектория $x_1(t)$ становится аттрактором. Время, в течение которого координата $x_2 \equiv 0$, зависит от коэффициента h . Начиная с этого времени система (5) вырождается в следующее скалярное уравнение

$$m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + h \frac{dx_1}{dt} + \{c + c^{(1)} [1 + \delta \sin(\Omega t)]\} x_1 = 0. \quad (6)$$

Его свойства будут определяться хорошо изученным уравнением Матье-Хилла [43].

Во втором случае (4) преобразуется к виду

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_0(t) \frac{dx}{dt} + c_0(t)x = 0, \quad (7)$$

$$\text{где } m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}; h_0(t) = \begin{bmatrix} h & \\ 0 & h - h^{(2)} [1 + \delta^{(2)} \sin(\Omega t)] \end{bmatrix}; c_0(t) = \begin{bmatrix} c & 0 \\ c^{(1)} [1 + \delta \sin(\Omega t)] & c \end{bmatrix}.$$

Асимптотически устойчивой будет координата x_1 . Следуя изложенному выше синергетическому принципу анализа, получаем уравнение, свойство которого определяет устойчивость системы (4), также определяется скалярным уравнением

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \{h - h^{(2)} [1 + \delta^{(2)} \sin(\Omega t)]\} \frac{dx_2}{dt} + cx_2 = 0. \quad (8)$$

Система (8) может стать абсолютно неустойчивой при условии $h - h^{(2)} [1 + \delta^{(2)} \sin(\Omega t)]$ при $t \in [0, \infty)$. Поэтому нас будут интересовать, прежде всего, случаи, когда на некоторых промежутках времени указанное выше условие не выполняется.

Приведенные выше случаи являются скорее исключением, чем правилом. В общем случае $\chi_1 \neq 1, \chi_2 \neq 1$ и $\chi_1 \neq 0, \chi_2 \neq 0$, а между ними существует известное условие нормировки $(\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 = 1$. При реальных значениях в системе (4) за счет взаимного влияния двух колебательных контуров формируется сложный динамический процесс, который стягивается по своим свойствам к двум процессам, описываемым уравнениями (6) и (8). Система (4) принципиально отличается от уравнения Матье-Хила, во-первых, тем, что в системе (4) имеет место взаимодействие двух колебательных контуров. Во-вторых, в этой системе периодически меняется матрица скоростных коэффициентов. Наконец симметричная часть матрицы скоростных коэффициентов может на отдельных временных промежутках становиться отрицательно определенной, то есть ускоряющей. Тогда на этих временных отрезках система теряет устойчивость. Причем потеря устойчивости, как правило, является колебательной. Тогда за счет чередования устойчивых и неустойчивых отрезков времени в системе формируются периодические движения. В общем случае для исследования системы (4) можно воспользоваться теорией Флоке для T_0 -периодических процессов [43].

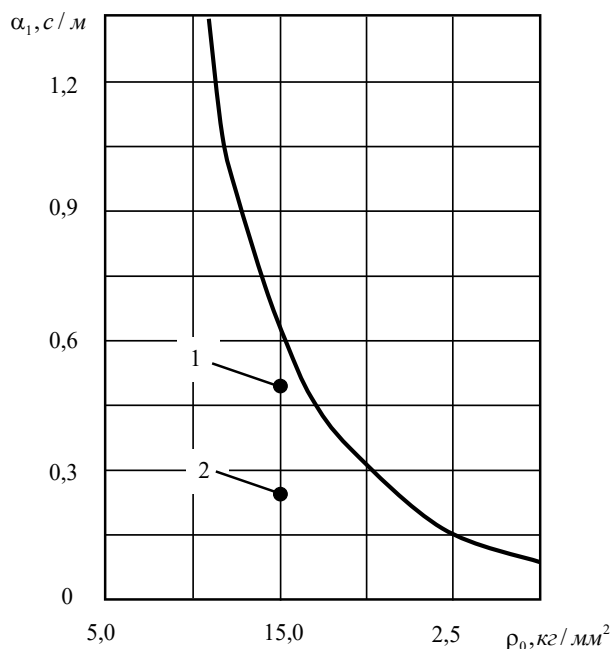
Проанализируем условия параметрического самовозбуждения на примере системы, параметры которой приведены в табл. 1. Дополним эти данные составляющими матрицы упругости и скоростных коэффициентов, изменяющимися по синусоидальному закону, причем период их изменения одинаков. Построение диаграмм параметрического самовозбуждения выполнено на основе прямого интегрирования рассматриваемых дифференциальных уравнений по методу Рунге-Кутты 4-го порядка. Погрешность метода не превышала 0,5%, что оценивалось на основе сравнения известных решений с полученными методом Рунге-Кутты. Построение диаграмм выполнено по сетке.

Таблица 1

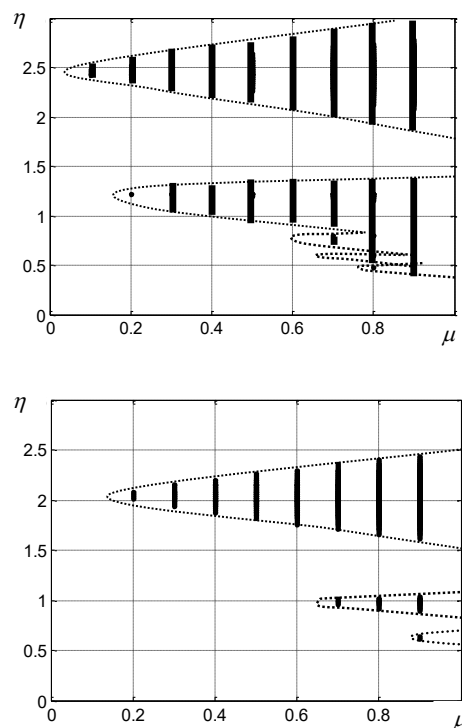
$m, [кг \cdot c^2 / мм]$	$h, [кг \cdot c / мм]$	$c, [кг / мм]$	$\alpha_2 [c / мм]$	μ	$F^{(0)} [кг]$
$3,0 \cdot 10^{-3}$	5,0	3000	65	0,5	2,0

Выполним анализ по следующей схеме: 1) проанализируем область устойчивости для случая $\mu_{i,s} = 9 = 0, i, s = 1, 2$; 2) для параметров из области устойчивости рассмотрим диаграмму устойчивости для уравнения Матье-Хилла (6); 3) проанализируем диаграмму параметрического самовозбуждения для системы (8); 4) для системы (4) рассмотрим два случая ($\chi_1 = 0,6, \chi_2 = 0,8$ и $\chi_1 = 0,8, \chi_2 = 0,6$); 5) выясним влияние на параметрическое самовозбуждение динамической связи, формируемой контактом задней грани режущего лезвия фрезы.

На рис. 2, а приведена область устойчивости системы в плоскости двух параметров: ρ_0 и α_1 системы (3). Ширина срезаемого слоя $b = 20 мм$. Слева от фигуративной линии система является устойчивой. Область вычислена для случая, когда $\mu_{i,s} = 9 = 0, i, s = 1, 2$. В дальнейшем рассмотрим две точки («1» и «2» на рис. 2), которые находятся в области параметров, при которых система устойчива. Однако точка «1» находится в непосредственной близости от фигуративной линии. На этой же иллюстрации (верхняя иллюстрация на рис. 2, б) приведены диаграммы параметрического самовозбуждения в системе (17) в плоскости « $\mu - \eta$ », как это принято при анализе уравнения Матье-Хилла [43]. На нижней иллюстрации рис. 2, б приведена аналогичная диаграмма для системы (8). Здесь $\eta = \Omega / \Omega_0$, $\Omega_0 = [(c + \chi_1 c^{(1)}) / m]^{0,5}$ при анализе уравнения (6) и $\eta = \Omega / \Omega_0$, $\Omega_0 = (c / m)^{0,5}$ при анализе уравнения (8). Все приведенные диаграммы параметрического самовозбуждения относятся к системе, параметры которой соответствуют точке «1» на рис. 2, а.



а)



б)

Рис. 2. Область устойчивости системы при $\mu_{i,s} = 9 = 0, i, s = 1, 2$

и диаграмма параметрического самовозбуждения

Если рассмотреть эти же диаграммы для точки «2» на рис. 2, а, диаграмма параметрического самовозбуждения для уравнения (6) остается практически без изменения, а для уравнения (8) лепестки неустойчивого поведения существенно уменьшаются, как показано на рис. 3, а. Приведем также примеры диаграмм параметрического самовоз-

буждения системы для случая, когда нет угловых коэффициентов равных нулю. В этом случае параметрическое самовозбуждение за счет периодических изменений матрицы упругости и скоростных коэффициентов становятся взаимосвязанными. На рис. 3, б приведены диаграммы для системы (4), имеющей угловые коэффициенты: $\chi_1 = 0,6$, $\chi_2 = 0,8$.

На рис. 3, в — для угловых коэффициентов $\chi_1 = 0,8$, $\chi_2 = 0,6$.

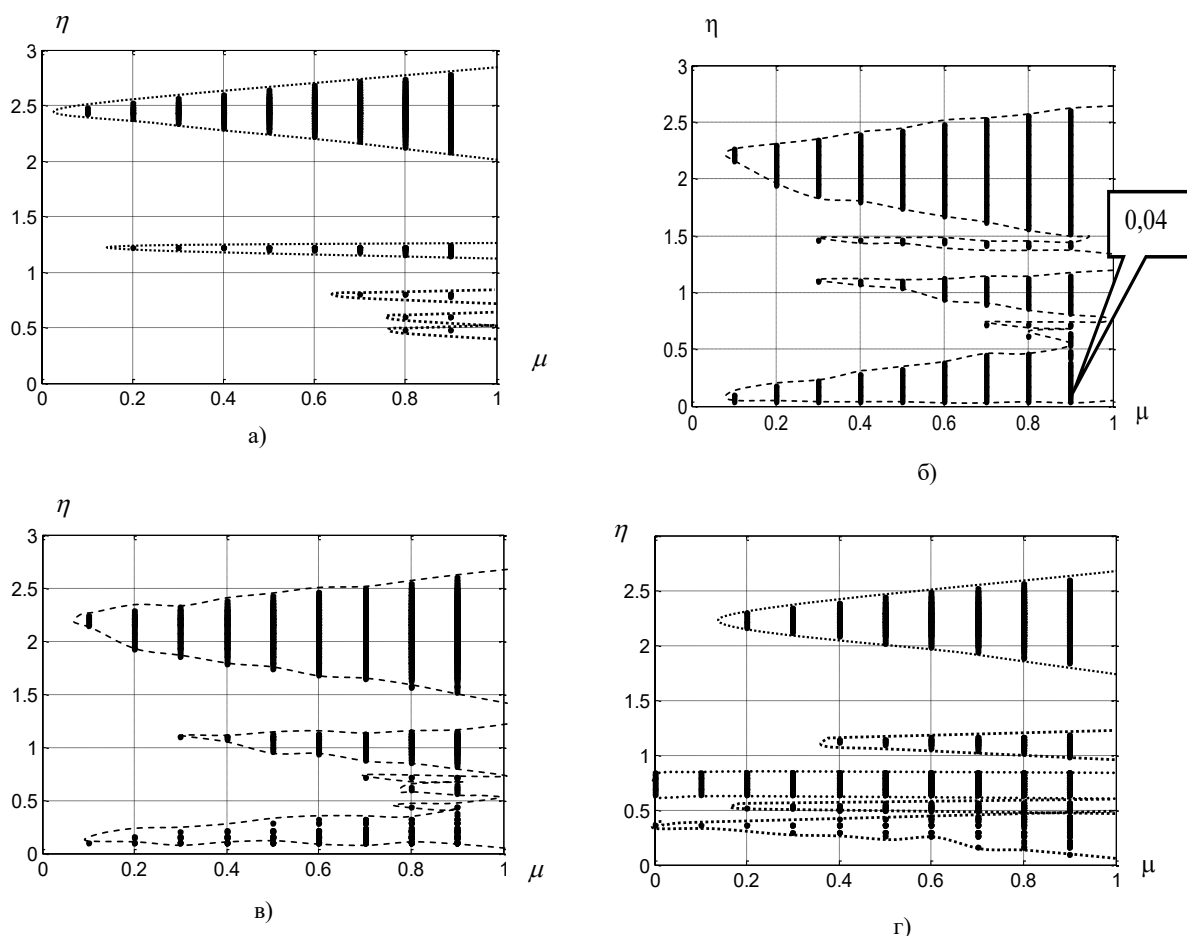


Рис. 3. Примеры диаграмм параметрического самовозбуждения системы фрезерования

На рис. 3, г при $\chi_1 = 0,8$, $\chi_2 = 0,6$ учтены связи, формируемые в зоне контакта задней грани инструмента с обрабатываемой деталью, то есть для полной системы дифференциальных уравнений (3).

Анализ результатов. По мере увеличения частоты вращения инструмента и приближения её к одной из собственных частот динамической системы фрезерования наблюдаются явления параметрического самовозбуждения системы. Если рассматривать динамическую систему (4) как систему с постоянными параметрами ($\delta^{(1)} = \delta^{(2)} = \vartheta = 0$), то по мере увеличения скорости резания существует ограниченный диапазон, в котором стационарная траектория упругих деформационных смещений теряет устойчивость. Это обусловлено, как показано ранее [41], преобразованием симметричной составляющей матрицы скоростных коэффициентов математической модели динамической системы фрезерования из положительно определенной в отрицательно определенную. Это преобразование зависит, прежде всего, от запаздывания сил по отношению к деформационным смещениям и от крутизны уменьшения сил при возрастании скорости. В реальных системах, начиная с некоторой скорости резания, система вновь теряет устойчивость. При этом симметричная часть матрицы скоростных коэффициентов, как правило, остается положительно определенной. Как показано выше, это обусловлено параметрическим самовозбуждением системы, то есть в этом случае механизмы потери устойчивости имеют другую природу. Аналогичный эффект наблюдается и при уменьшении жесткости инструмента. Поэтому при выборе технологических режимов, прежде всего скорости резания, существует оптимальный диапазон, в котором система фрезерования остается устойчивой.

Исследования показывают, что на условие самовозбуждения оказывают влияние практически все параметры динамической связи, технологические режимы (прежде всего скорость резания, влияющая на частоту вращения инструмента) и геометрия инструмента. Параметрическое самовозбуждение зависит от близости параметров системы к границе области устойчивости подсистемы при $\delta^{(1)} = \delta^{(2)} = \vartheta = 0$. Приближение параметров к этой границе не только расширяет лепестки неустойчивого поведения системы, но и приводит к образованию этих лепестков в области малых

скоростей резания. К расширению области неустойчивости приводит и увеличение связанности двух взаимодействующих через процесс резания колебательных контуров подсистемы инструмента. Наибольшей стабильностью стационарные траектории обладают в системах, уравнение которых близко к уравнению Матье-Хилла. В этом случае первый лепесток области неустойчивости близок к двойной собственной частоте колебательного контура. Все перечисленные выше факторы снижают частоту вращения инструмента, начиная с которой наблюдается параметрическое самовозбуждение.

Несмотря на то, что дополнительная связь, формируемая в контакте задней грани инструмента с обрабатываемой деталью, имеет смысл нелинейной диссипации, за счет параметрического взаимодействия она также вызывает расширение области неустойчивости и смещение ее границы в область малых частот вращения инструмента. Это связано с тем, что вариации скорости подачи, обусловленные периодическими упругими деформационными смещениями инструмента, за счет этой связи лишь увеличивают вариации параметров динамической системы.

Приведенный материал образует информационную базу для построения систем динамической диагностики состояния процесса фрезерования. В отличие от точения, для которого предложены алгоритмы диагностирования [44], при фрезеровании эти алгоритмы должны быть дополнены оценками, основанными на стробоскопическом отображении Пуанкаре с периодом, определяемом периодом повторения установившихся стационарных траекторий.

Выводы. Параметрическое самовозбуждение динамической системы фрезерования, обусловленное периодическими изменениями практически всех параметров динамической системы, являются одним из важных факторов потери устойчивости стационарных траекторий. Эти траектории фактически определяют параметры качества формируемой резанием поверхности. Приведенный материал позволяет наметить пути выбора технологических параметров и геометрии инструмента из условий устойчивости траекторий формообразующих движений инструмента относительно заготовки при фрезеровании концевыми фрезами, тем самым обеспечивая проектируемое качество обрабатываемой детали. Особенно актуален выбор параметров при создании программ ЧПУ обработки деталей сложной геометрической формы.

Библиографический список

1. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек. — Ростов-на-Дону : Терра, 2006. — 880 с.
2. Заковоротный, В. Л. Синергетический системный синтез управляемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей / В. Л. Заковоротный, А. Д. Лукьянов, Д. А. Нгуен, Д. Т. Фам. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2008. — 324 с.
3. Zakovorotny, V. L., Lukyanov, A. D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium // Int. J. of Mechanical Engineering and Automation. — 2014. — Vol. 1, № 5. — P. 271 – 285.
4. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый ; [пер. с чешск.]. — Москва : Машгиз, 1956. — 395 с.
5. Tlustý, I., Poláček, M., Danek, O., Spacek, L. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Veb Verlag Technik, Berlin, 1962. — 320 p.
6. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965. — 350 p.
7. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.
8. Эльясберг, М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: теория и практика / М. Е. Эльясберг. — Санкт-Петербург : ОКБС, 1993. — 182 с.
9. Вейц, В. Л. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке мало жестких заготовок / В. Л. Вейц, Д. В. Васильков // СТИН. — 1999. — № 6. — С. 9–13.
10. Заковоротный, В. Л. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки / В. Л. Заковоротный, Д. Т. Фам, С. Т. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2011. — № 2. — С. 38–46.
11. Заковоротный, В. Л. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении / В. Л. Заковоротный, Д. Т. Фам, С. Т. Нгуен // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — № 7(50). — С. 1005–1015.
12. Соколовский, А. П. Вибрации при работе на металлорежущих станках. Исследование колебаний при резании металлов / А. П. Соколовский. — Москва : Машгиз, 1958. — 158 с.
13. Мурашкин, Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 192 с.
14. Zakovorotny, V. L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. — Vol. 10. — P. 102 – 116.

15. Zakovorotny, V. L., Lukyanov A. D., Bykador V. S. Dynamic self-organization in cutting process. Proceedings of the 6-th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Delgada/Azores, 26-30 July, 2015. P 119 – 134
16. Заковоротный, В. Л. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием / В. Л. Заковоротный, Д. Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. — С. 26–40.
17. Заковоротный, В. Л. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов / В. Л. Заковоротный, Д. Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. — С. 40–53.
18. Stepan, G. Delay-differential equation models for machine tool chatter (ed. Moon, F. C.)// John Wiley, NY, 1998. — P. 165–192.
19. G. Stepan, T. Insperger and R. Szalai. Delay, Parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes / Int. J. of Bifurcation and Chaos, 2005. — Vol. 15, № 9. — P. 2783 – 2798.
20. Sridhar, R., Hohn R. E., Long G. W. A stability algorithm for the general milling process: Contribution to machine tool chatter research-7 // ASME Journal of Engineering for Industry. — 1968. — Vol. 90, №2. — P. 330 – 334.
21. Altintas, Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling // Annals of the CIRP. — 1995. — Vol. 44, №1. — P. 357 – 362.
22. Tlustý, J., Ismail, F. Special aspects of chatter in milling // ASME Journal of Vibration, Stress, and Reliability in Design. — 1983. — Vol. 105, №1. — P. 24 – 32.
23. Minis, I., Yanushevsky, T. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling // Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. — 1993. — Vol. 115, № 2. — P. 1 – 8.
24. Insperger T., Stepan, G. Stability of the milling process // Periodical Polytechnic-Mechanical Engineering. — 2000. — Vol. 44, №1. — P. 47 – 57.
25. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability in milling. Part I: General formulation // ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. — 1998. — Vol. 120, № 6(1). — P. 22 – 30.
26. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability conditions for multi-degree of systems in milling. Part II: Applications // ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. — 1998. — Vol. 120, № 6 (1) — P. 31 – 36.
27. Merdol, D., Altintas, Y. Multi-frequency solution of chatter stability for low immersion milling // ASME J. Manuf. Sci. Eng. — 2004. — Vol. 126, № 3. — P. 459 – 466.
28. Insperger, T., Mann, B., Stepan, G., Bayly, P.V. Stability of up-milling and down-milling. Part 1: Alternative analytical methods // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. — 2003. — Vol. 43, № 1 — P. 25 – 34.
29. Kline, W.A., Devor, R. E., Shareef I. A. The prediction of surface accuracy in end milling // ASME J. Eng. Ind. — 1982. — Vol. 104, № 5. — P. 272 – 278.
30. Elbestawi, M. A., Sagherian, R. Dynamic modeling for the prediction of surface errors in milling of thin-walled sections // Theor. Comput. Fluid Dyn. — 1991. — Vol. 25, № 2 — P. 215 – 228.
31. Campomanes, M. L., Altintas, Y. An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions // Trans. ASME. J. of Manuf. Sci. and Eng. — 2003. — Vol. 125, №3. — P. 416 – 425.
32. Paris, H., Peigne, G., Mayer, R. Surface shape prediction in high-speed milling // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. — 2004. — Vol. 44, №15. — P. 1567 – 1576.
33. Altintas, Y., Lee, P. A general mechanics and dynamics model for helical end mills // Annals of the CIRP. — 1996. — Vol. 45, № 1. — P. 59 – 64.
34. Ozturk, E., Budak, E. Modeling of 5-axis milling processes // Machining Science and Technology. — 2007. — Vol. 11, № 3. — P. 287 – 311.
35. Budak, E., Ozturk, E., Tunc, L.T. Modeling and simulation of 5-axis milling processes // Annals of CIRP. Manufacturing Technology. — 2009. — Vol. 58, № 1. — P. 347 – 350.
36. Bravo, U, Altuzarra, O, Lopez de Lacalle, L.N., Sanchez, J.A., Campa, F.J. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. — 2005. — Vol. 45. — P. 1669 – 1680.
37. Weinert, K., Kersting, P., Surmann, T., Biermann D. Modeling regenerative workpiece vibrations in five-axis milling // Prod. Eng. Res. Devel. — 2008. — № 2. — P. 255 – 260.
38. Biermann, D., Kersting, P., Surmann, T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades // CIRP Annals. Manufacturing Technology. — 2010. — Vol. 59, № 1 — P. 125 – 128.
39. Воронов, С. А. Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса / С. А. Воронов, И. А. Киселев, С. В. Аршинов // Вестник Мос. гос. техн. ун-та им. Н.Э.Баумана. Серия Машиностроение. — 2012. — Спец. вып. № 6. — С. 50–69.

40. Воронов, С. А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей / С. А. Воронов, А. В. Непочатов, И. А. Киселев // Известия вузов. Машиностроение. — 2011. — № 1 (610). — С. 50–62.
41. Заковоротный, В. Л. Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай малой скорости резания) / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 1 (85). — С. 50–62.
42. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. — Москва : Гостехиздат, 1950. — 167 с.
43. Д'Анжело, Г. Линейные системы с переменными параметрами / Г. Д'Анжело. — Москва : Машиностроение, 1974. — 287 с.
44. Заковоротный, В. Л. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки / В. Л. Заковоротный, И. В. Ладник // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1991. — № 4. — С. 75–81.

References

1. Zakovorotny, V.L., Flek, M.F. Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod. [Cutting process dynamics. Synergetic approach.] Rostov-on-Don: Terra, 2006, 880 p. (in Russian).
2. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D., Nguen Xuan Chiem, Pham Dinh Tung. Sinergeticheskiy sistemnyy sintez upravlyаемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей. [Synergetic system synthesis of controlled dynamics of machine tools with coupling evolution.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2008, 324 p. (in Russian).
3. Zakovorotny, V. L., Lukyanov, A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium. Int. J. of Mechanical Engineering and Automation, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 271 – 285.
4. Tlustý, I. Avtokolebaniya v металлорежущих станках. [Self-oscillations in machine tools.] transl. from Czech. Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian).
5. Tlustý, I., Poláček, M., Danek, O., Spacek, L. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Veb Verlag Technik, Berlin, 1962, 320 p.
6. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965, 350 p.
7. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Machine dynamics.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).
8. Elyasberg, M. E. Avtokolebaniya металлорежущих станков: теория и практика. [Self-oscillations of machine tools: Theory and Practice.] St. Petersburg: OKBS, 1993, 182 p. (in Russian).
9. Weiz, V.L., Vasilkov, D.V. Zadachi dinamiki, modelirovaniya i obespecheniya kachestva pri mekhanicheskoy obrabotke malozhestkikh zagotovok. [Problems of dynamics, simulation and quality assurance under machining of non-rigid workpieces.] STIN, 1999, no. 6, pp. 9–13 (in Russian).
10. Zakovorotny, V.L. Pham Dinh Tung, Nguen Xuan Chiem. Matematicheskoe modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya dinamicheskikh svoystv podsystemy instrumenta i zagotovki. [Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of the subsystem of the cutting tool and workpiece in the turning.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2011, no. 2, pp. 38–46 (in Russian).
11. Zakovorotny, V.L. Pham Dinh Tung, Nguen Xuan Chiem. Modelirovanie deformatsionnykh smeshcheniy instrumenta otnositel'no zagotovki pri tochenii. [Modeling of tool deformation offsetting to workpiece in turning.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 7 (50), pp. 1005–1015 (in Russian).
12. Sokolovskiy, A.P. Vibratsii pri rabote na металлорежущих станках. Issledovanie kolebaniy pri rezanii metallov. [Vibrations at work on machine tools. Study on vibrations under metal cutting]. Moscow: Mashgiz, 1958, 158 p. (in Russian).
13. Murashkin, L.S., Murashkin, S.L. Prikladnaya nelineynaya mekhanika stankov. [Applied nonlinear machine mechanics.] Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 192 p. (in Russian).
14. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2015, vol. 10, pp. 102 – 116 (in Russian).
15. Zakovorotny, V.L., Lukyanov A.D., Bykador V.S. Dynamic self-organization in cutting process. Proceedings of the 6-th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Delgada/Azores, 26-30 July, 2015, pp. 119 – 134.
16. Zakovorotny, V.L. Pham D.-T., Bykador, V.S. Samoorganizatsiya i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy obrabotki metallov rezaniem. [Self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 26–40 (in Russian).
17. Zakovorotny, V.L. Pham D.-T., Bykador, V.S. Vliyanie izgibnykh deformatsiy instrumenta na samoorganizatsiyu i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy rezaniya metallov. [Influence of a flexural deformation of a tool on self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 40–53 (in Russian).

18. Stepan, G. Delay-differential equation models for machine tool chatter. Moon, F.C., ed. John Wiley, NY, 1998, pp. 165–192.
19. Stepan, G., Insperger, T., and Szalai, R. Delay, Parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783 – 2798.
20. Sridhar, R., Hohn, R.E., Long, G.W. A stability algorithm for the general milling process: Contribution to machine tool chatter research-7. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1968, vol. 90, no. 2, pp. 330 – 334.
21. Altintas, Y., Budak, E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *Annals of the CIRP*, 1995, vol. 44, no. 1, pp. 357 – 362.
22. Tlustý, J., Ismail, F. Special aspects of chatter in milling. *ASME Journal of Vibration, Stress, and Reliability in Design*, 1983, vol. 105, no. 1, pp. 24 – 32.
23. Minis, I., Yanushevsky, T. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling. *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, 1993, vol. 115, no. 2, pp. 1 – 8.
24. Insperger, T., Stepan, G. Stability of the milling process. *Periodical Polytechnic-Mechanical Engineering*, 2000, vol. 44, no. 1, pp. 47 – 57.
25. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability in milling. Part I: General formulation. *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*. 1998, vol. 120, no. 6(1), pp. 22 – 30.
26. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability conditions for multi-degree of systems in milling. Part II: Applications. *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*. 1998, vol. 120, no. 6 (1), pp. 31 – 36.
27. Merdol, D., Altintas, Y. Multi-frequency solution of chatter stability for low immersion milling. *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 459 – 466.
28. Insperger, T., Mann, B., Stepan, G., Bayly, P.V. Stability of up-milling and down-milling. Part 1: Alternative analytical methods. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 1, pp. 25 – 34.
29. Kline, W.A., Devor, R. E., Shareef I. A. The prediction of surface accuracy in end milling. *ASME J. Eng. Ind.*, 1982, vol. 104, no. 5, pp. 272 – 278.
30. Elbestawi, M. A., Sagherian, R. Dynamic modeling for the prediction of surface errors in milling of thin-walled sections. *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 1991, vol. 25, no. 2, pp. 215 – 228.
31. Campomanes, M.L., Altintas, Y. An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions. *Trans. ASME. J. of Manuf. Sci. and Eng.*, 2003, vol. 125, no. 3, pp. 416 – 425.
32. Paris, H., Peigne, G., Mayer, R. Surface shape prediction in high-speed milling. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, no. 15, pp. 1567 – 1576.
33. Altintas, Y., Lee, P. A general mechanics and dynamics model for helical end mills. *Annals of the CIRP*, 1996, vol. 45, no. 1, pp. 59 – 64.
34. Ozturk, E., Budak, E. Modeling of 5-axis milling processes. *Machining Science and Technology*, 2007, vol. 11, no. 3, pp. 287 – 311.
35. Budak, E., Ozturk, E., Tunc, L.T. Modeling and simulation of 5-axis milling processes. *Annals of CIRP. Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, no. 1, pp. 347 – 350.
36. Bravo, U., Altuzarra, O., Lopez de Lacalle, L.N., Sanchez, J.A., Campa, F.J. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1669 – 1680.
37. Weinert, K., Kersting, P., Surmann, T., Biermann D. Modeling regenerative workpiece vibrations in five-axis milling. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2008, no. 2, pp. 255 – 260.
38. Biermann, D., Kersting, P., Surmann, T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades. *CIRP Annals. Manufacturing Technology*. 2010, vol. 59, no. 1, pp. 125 – 128.
39. Voronov, S.A., Kiselev, I.A., Arshinov, S.V. Metodika primeneniya chislennogo modelirovaniya dinamiki mnogokoordinatnogo frezerovaniya slozhnoprofil'nykh detaley pri proektirovanii tekhnologicheskogo protsessa. [Application methods of numerical modeling of the dynamics of multi-axis milling of complex profile parts in technological process design.] *Vestnik MSTU. Series Machine Building*. 2012, spec. iss. no. 6, pp. 50–69 (in Russian).
40. Voronov, S.A., Nepochatov, A.V., Kiselev, I.A. Kriterii otsenki ustoychivosti protsessa frezerovaniya nezhestkikh detaley. [Stability criteria evaluation process of milling of non-rigid parts.] *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 1 (610), pp. 50–62 (in Russian).
41. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Sinergeticheskiy podkhod pri izuchenii ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya bokovymi granyami kontsevykh frez (sluchay maloy skorosti rezaniya). [Synergetic approach to studying stability of form-building trajectories of climb milling by side edges of endmills (low cutting speed case).] *Vestnik of DSTU*, 2016, no. 1 (85), pp. 50–62 (in Russian).
42. Lyapunov, A M. Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya. [A general problem on motion stability.] Moscow: Gostekhizdat, 1950, 167 p. (in Russian).

43. D'Angelo, G. Lineynye sistemy s peremennymi parametrami. [Linear systems with variable parameters.] Moscow: Mashinostroenie, 1974, 287 p. (in Russian).

44. Zakovorotny, V.L., Ladnik, I.V. Postroenie informatsionnoy modeli dinamicheskoy sistemy metallovezhushchego stanka dlya diagnostiki protsessa obrabotki. [Building of data model of the machine tool dynamic system for treatment process diagnostics.] Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 1991, no. 4, pp. 75–81 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.01.2016

Сдана в редакцию 22.01.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 004.89+621.518.2

DOI 10.12737/19685

Выявление нечеткой границы стойкости режущего инструмента с использованием метода контрольных карт*

А. К. Тугенгольд¹, А. И. Изюмов², Д. Ю. Терехов^{3**}^{1,2,3} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Identification of fuzzy boundaries of cutter power using control chart method ***

A. K. Tugengold¹, A. I. Izyumov², D. Y. Terekhov^{3**}

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

В совокупность знаний интеллектуальной системы управления e-MindMachine многооперационного станка включены сведения о состоянии каждого инструмента, в том числе время остаточной стойкости. Это необходимо для получения заключения о возможности выполнения планируемого технологического перехода, о величине размерного износа, о необходимости изменения режимов резания при работе в области нечеткой пограничной полосы и пр. Кроме описанных ранее методов оценки начального и конечного значений времени пограничной полосы, как зоны неопределенности состояний, предлагается наглядный метод с использованием модификации контрольных карт Шухарта. Адаптивные контрольные карты позволили отслеживать ход процесса изнашивания инструмента, предупреждая об отклонениях от предъявляемых к процессу требований. Представлен план работы с соответствующими контрольными картами и примеры их использования для оценки состояния инструмента и прогнозирования параметров пограничной полосы. Приведены зависимости оценок математического ожидания размерного износа и рассеяния в пределах зоны линейного изнашивания инструмента, соответствующих скоростных зависимостей и апостериорных значений при предстоящей работе в области пограничной полосы. На этой базе прогнозируются оценки времени начала и конца пограничной полосы. Обработка статистических данных контрольных карт проведена с использованием прикладного пакета MATLABStatisticstoolbox.

Ключевые слова: многооперационный станок, мониторинг состояния инструмента, нечеткая граница размерной стойкости инструмента, контрольные карты Шухарта

The body of knowledge of the intelligent control system e-MindMachine of the multi-operation machine contains each tool condition data including its remaining life time. This is required to obtain conclusions on the possibility of the planned machining pass, the wear size value, the necessity to change cutting conditions during the operation in the fuzzy boundary strip area, etc. In addition to the previously described methods of assessing the initial and final values of the boundary strip time as an uncertainty state area, a visual method using a modification of Shewhart control charts is offered. The adaptive control charts allow tracking the tool wear progress warning of deviations from the requirements to the process. A program sheet with the appropriate control charts and examples of their usage for the assessing the tool state and forecasting the boundary strip parameters is presented. The dependences of estimations of the expectation of the wear size and scattering within the linear tool wear zone, appropriate velocity functions and a posteriori values for the future operation in the boundary strip area are described. On this basis, the timing estimation of the boundary strip head and end is predicted. The processing of the statistical control charts is performed by the MATLABStatisticstoolbox application package.

Key words: multioperational machine, tool state monitoring, fuzzy boundary of tool wear size, Shewhart control charts.

Введение. Основной задачей развития системы мониторинга и управления состоянием инструмента на станках является повышение производительности и экономической эффективности за счет увеличения сроков службы инструмента, минимизации простоев станков, сокращения и предотвращения повреждений обрабатываемых деталей. В функции системы мониторинга инструмента входят сбор, хранение и анализ некоторого количества явных или кос-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: akt0@yandex.ru, andrei-igorevich1991@yandex.ru, terekhov.d.iu@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

венных параметров описания инструмента, находящегося на станке, для суждения о его стойкости, состоянии и изменениях в процессе обработки. В частности, внимание данной проблеме было уделено в работах [1–3]. Полученные оценки состояния и периода стойкости служат основой для принятия решений по управлению функциями его использования или замены.

Понятие нечеткой полосы стойкости инструмента введено в связи с необходимостью автоматизированной оценки работоспособности режущего инструмента и управления его состоянием при работе многооперационных станков с ЧПУ в режиме «безлюдной технологии» [4–5]. Параметры граничной стойкости — это оценочные значения в периоде стойкости на некотором интервале времени, пути или объема удаленного материала при резании до предела размерного или начала катастрофического износа инструмента.

В соответствии с теорией нечетких знаний используются представления нечеткой границы и нечеткой пограничной полосы стойкости. Для пояснения этих понятий введены следующие термины: нечеткая граница общей стойкости инструмента (до затупления); нечеткая граница размерной стойкости инструмента, представленная на рис. 1; ширина пограничной полосы b , характеризующаяся доверительным интервалом (например, по времени — T_a и T_b), который на основе экспертных оценок отображает наступление рассматриваемого вида износа.

Предложенная в работе [6] бортовая интеллектуальная система управления e-MindMachine многооперационного станка предназначена для достижения максимальной эффективности обработки деталей и безотказности функционирования в сочетании с возможностями самообслуживания станка. В совокупность знаний блока наблюдений и принятия решений по управлению состоянием инструмента на станке должны быть включены:

- Знания о состоянии инструмента по соотношению определяемых параметров времени обработки поверхности с периодом стойкости i -го инструмента и нечеткой границы стойкости. Так, например, время остаточной стойкости инструмента T_{ni} к моменту начала резания на n -м переходе использования i -го инструмента определяется зависимостью:

$$T_{ni} = T_{ai} - \sum_{j=1}^{n-1} t_{ji},$$

где T_{ai} — период времени до наступления нечеткой границы стойкости; t_{ji} — время резания инструментом при выполненном j -ом технологическом переходе.

- Знание о допустимой величине размерного износа инструментов при выполнении переходов обработки детали, ограниченной допуском по размерной точности поверхности.
- Принятие решений по проведению измерений, диагностированию и мониторинга состояния инструмента.
- Принятие решений по изменению режимов обработки с помощью блока адаптации и специальных режимов резания при переходе к работе в пограничной полосе.
- Принятие решений по необходимости коррекции положения инструмента, по замене инструмента.

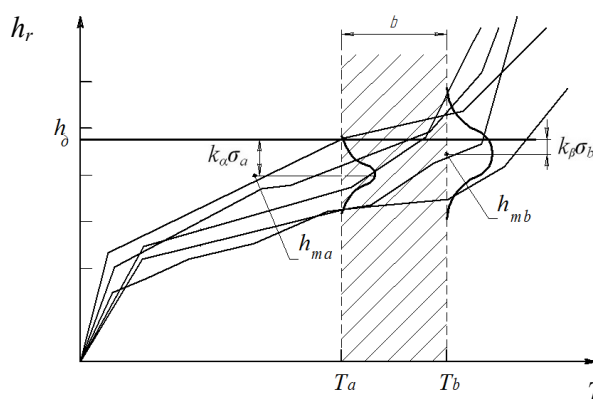


Рис. 1. Нечеткая граница размерной стойкости инструмента; h_0 — допустимое значение размерного износа

Все это определяет значимость определения и обоснования методов оценки параметров пограничных полос стойкости инструментов. Такой подход предполагает возможность перехода в режим обработки с использованием процедуры диагностирования состояния инструмента и процесса резания, повышения вероятности безотказной работы технологической системы в условиях компьютеризированного производства. При этом учитывается нецелесообразность прерывания процесса резания и замены инструмента при незавершенной обработке поверхности в связи с близостью предельного состояния его износа. На основе имеющейся информации возможно внесение коррекции режимов резания для снижения интенсивности износа.

В статье [7] представлены три метода оценки значений времени пограничной полосы: на основе полноценного статистического подхода к определению времени стойкости, метода ускоренных испытаний инструмента и адаптивной системы нейро-нечеткого вывода ANFIS в среде MATLAB с пакетом расширения FuzzyLogicToolbox. Кроме этих методов, предлагается использование так называемых контрольных карт (КК), аналогичных КК Шухарта [8], в качестве средства для оценивания и прогнозирования состояния режущих инструментов в процессе работы.

Известный американский инженер и математик, специалист в области управления качеством У. Шухарт предложил идею управления технологическими процессами с целью предупреждения появления несоответствий. Им был разработан достаточно простой способ, основанный на методах теории вероятностей и математической статистики, позволявший поддерживать процесс в статистически устойчивом состоянии и тем самым предупреждать появление неприемлемых процессов. Средство воплощения этого способа получило название контрольных карт Шухарта. В рассматриваемом контексте эксплуатации инструмента КК — средство, позволяющее отслеживать ход процесса изнашивания и принимать решения по воздействию на него с помощью обратных связей, предупреждая отклонения от предъявляемых к процессу требований.

Для проверки применимости метода следует проводить предварительное изучение процесса изнашивания при обработке с помощью КК. Рассматриваемые зоны состояния инструмента представлены на рис. 2 (в соответствии с [9]), где APL и RPL — верхняя и нижняя линии границ износа в сопоставлении с зонами приемлемого, неприемлемого процессов и зоной неопределенности процесса или пограничной зоной, в которой необходимо наблюдение за процессом; T — целевое значение контролируемого параметра износа.

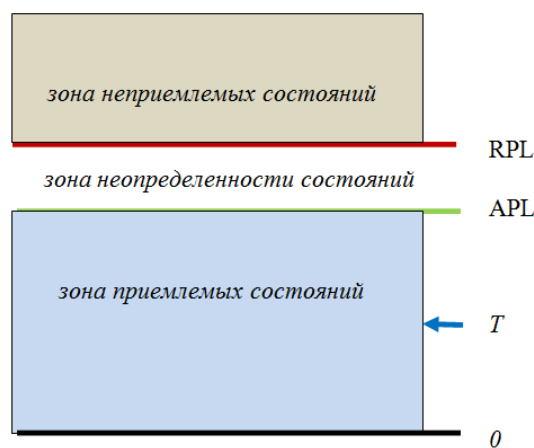


Рис. 2. Зоны состояния инструмента

Для пограничной зоны, т. е. зоны неопределенности состояний, характерно, что в ней отклонения от допустимых значений износа недостаточно малые (с вероятностью $1-\alpha$), чтобы уверенно принять, и недостаточно большие (с вероятностью $1-\beta$), чтобы уверенно отклонить решение о замене инструмента. Здесь α и β — допустимые риски по техническим условиям эксплуатации многооперационных станков с ЧПУ. Ширина этой пограничной зоны — функция экспертных требований к конкретному инструменту и допустимым величинам износа, а также установленным рискам.

При работе с КК статистической оценки состояния инструмента предусмотрен следующий план действий:

1. Выбор показателя износа, плана выборки, типа карты.
2. Сбор данных.
3. Вычисление выборочных статистик, центральной линии, контрольных пределов.
4. Построение КК.
5. Оценка состояния инструмента по допустимому износу.
6. Совершенствование системы.
7. Пересчет КК (при необходимости).

Как будет показано ниже, при выполнении п. 5 плана действий предусматривается возможность прогнозирования параметров пограничной полосы на основе проведенной статистической оценки с помощью КК для выборок в период нормального износа инструмента (рис. 3).

Экспериментальные исследования были проведены на вертикальном многооперационном станке OkumaMB-46VAE и ПК с программным обеспечением базы данных и системы знаний интеллектуального управляющего модуля при следующих условиях:

- В серии экспериментов в качестве материала заготовки использовалась сталь 45 (конструкционная углеродистая качественная, HB = 143...179 МПа).

- Режущий инструмент — концевые фрезы, твердосплавные, быстрорежущие, диаметр (D) — 10 мм, число зубьев (z) — 4.
- Условия эксперимента: использовалась партия концевых фрез, проводилась полуступенчатая обработка уступов, глубина фрезерования (t) — 4–8 мм, ширина фрезерования (B) — 35 мм.
- Подача на зуб для фрез диаметром 9–12 мм. (s_z) выбирается из диапазона 0,04–0,06 мм/зуб.
- Значения рассчитанного диапазона скоростей резания составили $V=100$ –130 м/мин. Обработка проводилась при усредненных режимах резания.

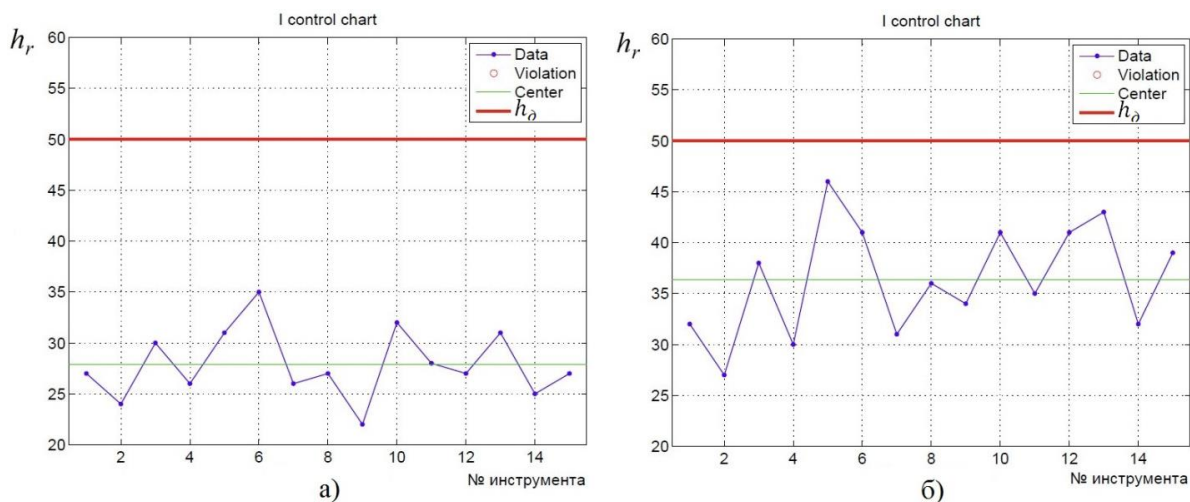


Рис. 3. Контрольные карты состояния инструмента для выборок при времени работы
а) $T_0 = 25$ мин и б) $T_1 = 40$ мин

Метод КК представляет собой простой графический метод оценки степени статистически неуправляемого состояния процесса путем сравнения значений отдельных статистических данных из серии выборок или подгрупп с контрольными границами. Карты разброса отдельных выборочных данных в выборках используют, чтобы определить наличие изменения стандартного отклонения и рассеяния в выборках с течением времени [9–15]. Так по КК, приведенным выше, можно судить об изнашивании инструмента во время обработки по изменению статистических характеристик этого процесса.

Задача прогнозирования параметров пограничной полосы сводится к нахождению оценок времени работы инструмента в начальной T_a и конечной T_b точках пограничной полосы (см. рис 1) при заданных соответствующих значениях рисков α и β превышения допустимого значения размерного износа h_0 . Эти значения рисков принимаются в качестве критериев для сигнализации о необходимости принять необходимые меры при достижении времени начала зоны пограничной полосы (зоны неопределенности процессов) и выхода из нее.

Отметим, что использование термина «оценка» здесь связано, во-первых, с погрешностями процедур измерений, во-вторых — с результатом, т. е. измеренными значениями, выдаваемыми в качестве решения, а в-третьих это характерный термин, применяемый в теории нечетких множеств, используемой в предлагаемом подходе.

С течением времени работы инструмента законы распределения описываются с помощью функций $h(t)$ и $\sigma_h(t)$, характеризующих изменение значений и рассеивания размерного износа. При этом функции, определяющие изменения параметров размерного износа и рассеивания его значений в зависимости от времени в первом приближении можно принять линейными, что соответствует работе инструмента в пределах зоны нормального износа.

$$h(t) = h_0 + y_h(t - t_0) \quad (1)$$

$$\sigma_h(t) = \sigma_0 + y_\sigma(t - t_0), \quad (2)$$

где h_0 и σ_0 — значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения износа при $t = t_0$, а $y_h(t)$ и $y_\sigma(t)$ — скорости их изменения.

Другим вариантом, определяющим функцию изменения параметра рассеивания в зависимости от времени резания, является представление степени рассеивания значений изучаемого параметра с помощью коэффициента вариации:

$$V = \frac{\sigma_h(t)}{h(t)}. \quad (3)$$

В соответствии с характером задачи ориентировочной оценки искомых значений допустимо принять V постоянным.

Значения T_a и T_b можно определить, найдя величины статистических оценок математических ожиданий распределений размерного износа h_{m0} и h_{m1} и среднеквадратических отклонений σ_0 и σ_1 для выборок при T_0 и T_1 в моменты времени работы инструмента, существенно меньшие времени критического износа. Воспользуемся при этом сначала линейным представлением зависимости рассеивания значений износа от времени. Процедура вычислений содержит следующие шаги:

Шаг 1. Оценка скорости изнашивания инструмента:

$$y_m = \frac{h_{m1} - h_{m0}}{T_1 - T_0}. \quad (4)$$

Шаг 2. Оценка приращения среднеквадратического отклонения:

$$y_\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{T_1 - T_0}. \quad (5)$$

Шаг 3. Оценка апостериорных текущих значений износа и соответствующих значений среднеквадратических отклонений (прогноз с учетом работы в период нормального износа):

$$h_{mi} = h_{m1} + y_m(T_i - T_1), \quad (6)$$

$$\sigma_i(t) = \sigma_1 + y_\sigma(T_i - T_1), \quad (7)$$

при $t = T_i$.

Шаг 4. Оценки T_a и T_b .

Эти значения можно найти при выполнении условий (рис. 1):

$$h_o = h_{ma} + k_\alpha \sigma_a, \quad (8)$$

$$h_o = h_{mb} + k_\beta \sigma_b, \quad (9)$$

где k_α, k_β — квантили стандартного закона нормального распределения (см. ГОСТ Р 50779.43–2001).

То есть при T_a и T_b прогнозируемые математические ожидания h_{ma} и h_{mb} будут отличаться от допустимой величины размерного износа на величины отклонений, не превышающих риска α , принятого для оценки начальной точки пограничной полосы, и риска β — для конечной точки соответственно.

На основе выражений (1), (2), (4)–(9) получены следующие зависимости для оценки времени начала и конца пограничной полосы:

$$T_a = T_1 + \frac{h_o - h_{m1} - k_\alpha \sigma_1}{y_m + k_\alpha y_\sigma}, \quad (10)$$

$$T_b = T_1 + \frac{h_o - h_{m1} - k_\beta \sigma_1}{y_m + k_\beta y_\sigma}. \quad (11)$$

Если же для оценки изменений рассеивания с течением времени принять зависимость (3) при постоянстве коэффициента вариации, то искомые выражения получат вид:

$$T_a = T_1 + \frac{h_o - h_{m1}(1 + k_\alpha V)}{y_m(1 + k_\alpha V)}, \quad (12)$$

$$T_b = T_1 + \frac{h_o - h_{m1}(1 + k_\beta V)}{y_m(1 + k_\beta V)}. \quad (13)$$

В процессе проведения эксперимента по анализу изнашивания концевой фрезы при указанных выше условиях получены КК, представленные на рис. 3. Обработка статистических данных проведена с использованием пакета MATLAB Statistics Toolbox (Shewhartcontrolcharts). Для периода работы $T_0 = 25$ мин оцениваемые значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения величины радиального износа концевых фрез составляют 27,26 и 3,62 мкм, для $T_1 = 40$ мин — 36,4 и 4,84 мкм соответственно. Расчетом с использованием зависимостей (10) и (11) получены прогнозируемые оценки $T_a = 45,7$ мин и $T_b = 52,3$ мин при выполнении условий (1) и (2), а с использованием (12) и (13) оценки $T_a = 46,3$ мин и $T_b = 52,9$ мин при выполнении условий (1) и (3) соответственно.

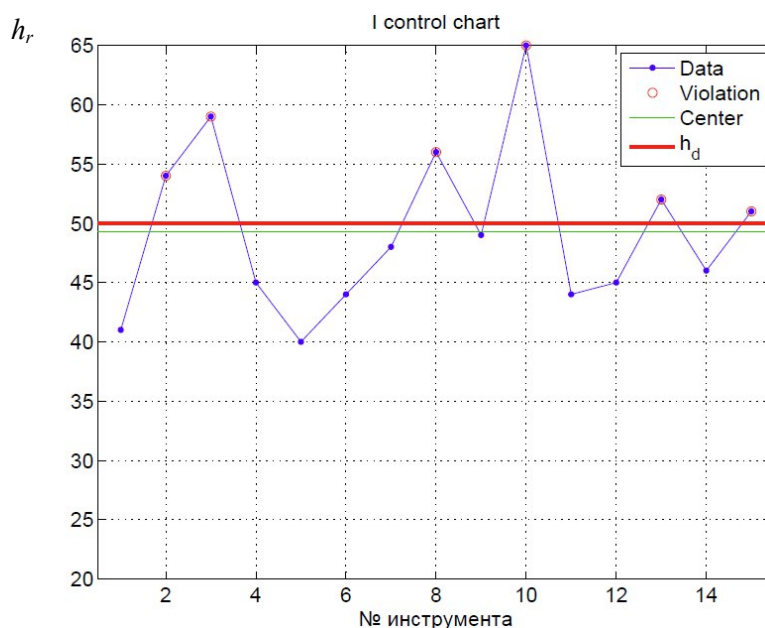


Рис. 4. Контрольная карта состояния инструмента для выборки при времени работы 55 мин

В качестве иллюстрации эффективности рекомендуемых решений на рис. 4 представлена КК для периода работы инструмента за пределами нечеткой пограничной полосы, т. е. превышающего верхнюю границу полосы T_b . При таком значении времени риск отказа инструмента по размерному износу составляет 32.8%, что недопустимо по техническим условиям.

Представленный метод прогнозирования нечеткой пограничной полосы применен в блоке мониторинга инструмента интеллектуальной системы e-MindMachine [6].

Выводы. Для выявления параметров нечеткой полосы стойкости инструмента на многооперационном станке предложен метод, основанный на возможностях применения контрольных карт. Введенная модификация контрольных карт предусматривает наглядную оценку близости статистических значений износа инструмента к допустимому значению стойкости. Полученные зависимости характеристик изнашивания позволяют прогнозировать параметры нечетких пограничных полос для управления процессами обработки. Эффективность метода подтверждена проведенными испытаниями.

Библиографический список

1. Vallejo, A. J. On-line Cutting Tool Condition Monitoring in Machining Processes using Artificial Intelligence / A.J. Vallejo // Robotics, Automation and Control, I-Tech, Vienna, Austria. — 2008. — p. 494.
2. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling / E. Bagci // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6(2). — p. 256–277.
3. Григорьев, С. Н. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, Н. Ю. Черкасова // Вестник Мос. гос. техн. ун-та «Станкин». — 2011. — № 3 (15). — С. 44–48.
4. Тугенгольд, А. К. Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы «ИНСТРУМЕНТ» в смарт-паспорте многооперационного станка / А. К. Тугенгольд, А. И. Изюмов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2. — С. 74–83.
5. Борисова, Л. В. О методике представления нечетких экспертных знаний / Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова, В. П. Димитров // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 4. — С. 93–102.
6. Тугенгольд, А. К. Модуль E-MIND MACHINE в интеллектуальной системе мониторинга станка / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, С. В. Ющенко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2015. — № 9(40) — С. 100–102.
7. Тугенгольд, А. К. Оценка нечеткой границы стойкости инструмента многооперационного станка / А. К. Тугенгольд, К. Г. Шучев, А. И. Изюмов, Д. Ю. Терехов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 2(81). — С. 33–41.

8. Соломин, С. И. Метод контрольных карт [Электронный ресурс] / С.И. Соломин. — Екатеринбург, 2014. — Режим доступа: <http://www.db.inforeg.ru/Inet/GetEzineByID/302964> (дата обращения: 19.01.16).
9. Статистические методы. Приемочные контрольные карты. ГОСТ Р 50779.43–99. — Москва : Издательство стандартов, 2003. — 28 с.
10. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. ГОСТ Р ИСО 7870–1–2011. — Москва : Стандартинформ, 2012. — 20 с.
11. Статистические методы. Приемочный контроль качества. ГОСТ Р 50779.30–95. — Москва : Издательство стандартов, 2000. — 23 с.
12. Статистические методы. Контрольные карты для арифметического среднего с предупреждающими границами. ИСО3534–1–931. ГОСТ Р 50779.41–96 (ИСО 7873–93). — Москва : Издательство стандартов, 2004. — 16 с.
13. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. ГОСТ Р 50779.42–99. — Москва : Стандартинформ, 2008. — 36 с.
14. Статистические методы. Приемочные контрольные карты. ГОСТ Р 50779.43–2001. — Москва : Стандартинформ, 2007. — 28 с.
15. Статистические методы. Руководство по внедрению статистического управления процессами. ГОСТ Р ИСО 11462–1–2007. — Москва : Стандартинформ, 2007. — 20 с.

References

1. Vallejo, A. J. On-line Cutting Tool Condition Monitoring in Machining Processes using Artificial Intelligence. Robotics, Automation and Control, I-Tech, Vienna, Austria. 2008, 494 p.
2. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling. Scientific Research and Essays, 2011, vol. 6(2), pp. 256–277.
3. Grigoryev, S.N., Gurin, V.D., Cherkasova, N.Y. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniya s pomoshch'yu diagnostirovaniya sostoyaniya instrumenta s uchetom dostovernosti otobrazheniya sostoyaniya ob'ekta po kriteriyu ego otказа. [Increasing milling performance with tool condition diagnostics taking into account validation of the object state display by its failure criterion.] Vestnik MSTU “STANKIN”, 2011, no. 3 (15), pp. 44–48 (in Russian).
4. Tugengold, A.K., Izyumov, A.I. Printsipy kontseptual'nogo podkhoda k sozdaniyu podsistemy «INSTRUMENT» v smart-pasporte mnogooperatsionnogo stanka. [Principles of conceptual approach to creating TOOL subsystem for multioperation machine smart-passport.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 74–83 (in Russian).
5. Borisova, L.V., Nurutdinova, I.N., Dimitrov, V.P. O metodike predstavleniya nechetkikh ekspertnykh znaniy. [On technique of fuzzy expert knowledge representation.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 93–102 (in Russian).
6. Tugengold, A.K., Voloshin, R.N., Yushchenko, S.V. Модуль E-MIND MACHINE в интеллектуальной системе мониторинга станка / [Module E-MIND MACHINE in the intellectual monitoring system of the machine.] International Research Journal, 2015, no. 9(40), pp. 100–102 (in Russian).
7. Tugengold, A.K., Shuchev, K.G., Izyumov, A.I., Terekhov, D.Y. Otsenka nechetkoy granitsy stoykosti instrumenta mnogooperatsionnogo stanka. [The estimation of fuzzy boundary of multioperational machine tool life.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 2(81), pp. 33–41 (in Russian).
8. Solomin, S.I. Metod kontrol'nykh kart. [Control chart method.] Ekaterinburg, 2014. Available at: <http://www.db.inforeg.ru/Inet/GetEzineByID/302964> (accessed: 19.01.16).
9. GOST R 50779.43–99. Statisticheskie metody. Priemochnye kontrol'nye karty. [GOST R 50779.43–99. Statistical methods. Acceptance control charts.] Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2003, 28 p. (in Russian).
10. GOST R ISO 7870–1–2011. Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty. Chast' 1. Obshchie printsipy. [GOST R ISO 7870–1–2011. Statistical methods. Control charts. Part 1. General guidelines.] Moscow: Standartinform, 2012, 20 p. (in Russian).
11. GOST R 50779.30–95. Statisticheskie metody. Priemochnyy kontrol' kachestva. [GOST R 50779.30–95. Statistical methods. Acceptance sampling. General requirements.] Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2000, 23 p. (in Russian).
12. ISO3534–1–931. GOST R 50779.41–96 (ISO 7873–93). Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty dlya arifmeticheskogo srednego s preduprezhdayushchimi granitsami. [ISO3534–1–931. GOST R 50779.41–96 (ISO 7873–93). Statistical methods. Control charts for arithmetic average with warning limits.] Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2004, 16 p. (in Russian).

13. GOST R 50779.42–99. Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty Shukharta. [GOST R 50779.42–99. Statistical methods. Shewhart control charts.] Moscow: Standartinform, 2008, 36 p. (in Russian).
14. GOST R 50779.43–2001. Statisticheskie metody. Priemochnye kontrol'nye karty. [GOST R 50779.43–2001. Statistical methods. Acceptance control charts.] Moscow: Standartinform, 2007, 28 p. (in Russian).
15. GOST R ISO 11462–1–2007. Statisticheskie metody. Rukovodstvo po vnedreniyu statisticheskogo upravleniya protsessami. [GOST R ISO 11462–1–2007. Guidelines for implementation of statistical process control (SPC.) Part 1: Elements of SPC (IDT).] Moscow: Standartinform, 2007, 20 p. (in Russian).

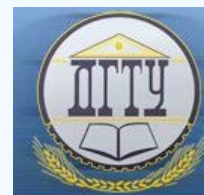
Поступила в редакцию 12.02.2016

Сдана в редакцию 12.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК. 621.313.17:519.87

DOI 10.12737/19688

Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования*

Н. Ф. Карнаухов¹, М. Н. Филимонов², Д. А. Статовой³, А. С. Лыков^{4}**^{1, 2, 3, 4}Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация**A review of torque ripple reducing methods based on mathematical simulation *******N. F. Karnaukhov¹, M. N. Filimonov², D. A. Statovoy³, A. S. Lykov^{4**}**^{1, 2, 3, 4}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Предметом данного исследования являются методы управления моментом вентильно-индукторного двигателя. Цель работы — обзор существующих методов снижения электромагнитных пульсаций на валу вентильно-индукторного двигателя. Для классификации методов управления электромагнитным моментом использовался сравнительный анализ существующих подходов к построению систем управления вентильными приводами. Результаты исследования могут применяться при выборе метода управления приводом, обеспечивая баланс между сложностью реализации системы управления и ее эффективностью. На основе сравнительного анализа сделаны выводы об эффективности нейросетевых систем управления моментом с оффлайн обучением, отмечены возможности улучшения данных систем с помощью управления коэнергией магнитной системы привода а также внесения в модель эффектов остаточной намагниченности материалов. Отмечено, что существующие системы, нивелирующие намагниченность материалов привода, снижают средний момент за цикл работы.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, технологическая машина; метод снижения пульсаций; малая и ползучая скорость; исполнительный механизм; математическая модель; моделирование.

The subject of this investigation is the methods of switched reluctance motors controlling. The study objective is to review the existing methods of reducing shaft electromagnetic torque ripple in the switched reluctance motors. A comparative analysis of the existing approaches to valve drives control systems development is used to classify the electromagnetic torque control methods. The study results can be used when selecting the drive control method providing a balance between the complexity of the control system implementation and its effectiveness. On the basis of the comparative analysis, the conclusions on the neural network torque control systems effectiveness with offline learning are made; the control system enhancement using co-energy magnetic drive system as well as the inclusion of the residual magnetization material effects in the model is marked. It is noted that the existing systems aligning the magnetization of the actuator materials reduce the average torque for the work cycle.

Keywords: switched reluctance motor, production machine, method of reducing torque ripple, slow and creep speed, executive mechanism, mathematical model, modeling.

Введение. Создание современных технологических машин (ТМ), включая промышленные роботы (ПР) широкого назначения, сопряжено с выбором привода и оценкой его технических возможностей — например, для реализации особых режимов работы электропривода и обеспечения нормативов технологического процесса. В настоящее время ведутся поиски схмотехнических решений по управлению вентильно-индукторным двигателем (ВИД). Исследуются возможности его применения в электроприводах промышленных роботов (ПР), другом технологическом обо-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: nika811@bk.ru, maxfil2006@yandex.ru, dr-monro@mail.ru, antonlykov.anton@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

рудовании (ТО), станочных и робототехнических системах (РТС). Известно [1, 2], что особенностью в работе упомянутых электроприводов является обеспечение повторно-кратковременных режимов и поддержание равномерности вращения (перемещения) исполнительного механизма (ИМ) рабочего органа (РО) в зоне малой скорости. При ряде хороших технических показателей ВИД и универсальности известных схем управления ими [3] существует некоторая проблема целевого применения таких двигателей в ТМ из-за наличия пульсирующих моментов на валу в зоне малой скорости перемещения ИМ. По мнению авторов, поиск приемлемого решения возможен. Он должен базироваться на взаимосвязи всех составляющих ТМ: механических, электрических, информационных, в целом определяющих технические характеристики и работоспособность ТМ. Решение задачи повышения равномерности движения и стабильности позиционирования ИМ с электроприводом на базе ВИД является важнейшим ориентиром при выборе электропривода ТМ, способного программно работать с заданными характеристиками в зоне низких и ползучих скоростей движения ИМ.

Постановка задачи. С развитием мультипроцессорных систем управления (МСУ) ТМ расширяются возможности обеспечения требований технологических режимов, усложняются алгоритмы работы ключевых элементов импульсного преобразователя (ИП) для формирования целесообразных законов разгона и торможения ВИД. Анализ ряда статей [4–7], рассматривающих возможность снижения пульсирующих моментов на валу ВИД с математическим обоснованием, показывает, что каждый метод имеет определенные преимущества и недостатки, затрудняющие окончательный выбор математического описания, например, системы управления конкретного ВИД с заданными параметрами и приемлемыми механическими характеристиками. Разброс суждений не позволяет пока дать однозначную оценку методам снижения уровня пульсирующих моментов на валу и схемотехническим решениям для повышения эффективности преобразования электроэнергии.

Подходы к решению задачи. Очевидная целесообразность применения ВИД в различных сферах деятельности человека обусловлена рядом достоинств его технических характеристик. Однако в электроприводах ТМ — в частности, в электроприводах промышленных роботов (ПР), другом технологическом оборудовании (ТО), станочных и робототехнических системах (РТС) ВИД используется недостаточно — как правило, на стадии разработки, экспериментальных исследований и пробных внедрений в электроприводы технологического оборудования (ТО) [2]. Поэтому в представленной статье особое внимание уделяется сравнительному обзору известных подходов к решению задачи, проводится анализ алгоритмов управления ВИД и предлагается примерное структурирование методов управления, позволяющих снизить пульсации момента на валу двигателя и повысить равномерность движения ИМ ТМ.

В настоящее время подходы к решению задачи снижения пульсаций момента на валу ВИД условно можно отнести к одной из двух групп.

— К первой относятся методы, определяемые изменением конструктивных параметров обмоток статора и ротора, технологиями изготовления магнитопроводов статора и ротора.

— Методы второй группы основаны на совершенствовании алгоритмов управления коммутацией обмоток, которые, в свою очередь, подразделяются на техники непрямого и прямого управления моментом.

Для методов, относящихся к первой группе, характерна недостаточность конструкторских решений и проработки технологического процесса производства ВИД, поэтому они не рассматриваются в данной статье. Судя по числу публикаций, в настоящее время имеются значимые наработки в области развития методов непрямого и прямого управления электромагнитным моментом ВИД. Техники непрямого управления моментом основаны на преобразовании мгновенного тока фаз двигателя в момент двигателя с помощью заранее известных статических характеристик. Общим для приведенных способов является измерение и управление косвенным параметром, имеющим прямую и линейную взаимосвязь с электромагнитным моментом ВИД. Так, метод использования функций разделения момента (ФРМ, в зарубежной литературе устоявшееся обозначение — torque sharing functions, TSF) основан на предположении, что каждая фаза ВИД создает независимый момент относительно других фаз [5]. В этом случае можно комбинацией управляющих воздействий на обмотку статора добиться снижения пульсаций момента, используя типовую структуру взаимного распределения моментов T_j в воздушном зазоре ВИД (рис. 1) с применением принципа ФРМ. Для этого вводится зависимость $T_j(\gamma_j, i_j)$, где T_j — момент, создаваемый обмоткой статора; γ_j — относительное положение зубца статора; i_j — ток статора для одной фазы.

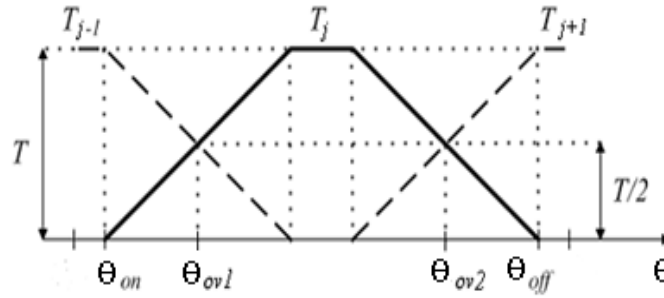


Рис. 1. Функции момента на валу ВИД

Согласно методу ФРМ [8] и зависимостям, приведенным на рис. 1, процесс формирования результирующего электромагнитного момента можно описать следующими соотношениями:

$$TSF(\theta_r) = \begin{cases} 0, & (0 < \theta_r < \theta_{on}) \\ f_{up}^l(\theta_r), & (\theta_{on} < \theta_r < \theta_{on} + \theta_{ov1}) \\ T_e, & (\theta_{on} + \theta_{ov1} < \theta_r < \theta_{ov2}), \\ f_{dn}^l(\theta_r), & (\theta_{ov2} < \theta_r < \theta_{off}) \\ 0 & (\theta_{off} < \theta_r) \end{cases} \quad (1)$$

где θ_r — текущее положение фазы ротора; $f_{up}^l(\theta_r)$, $f_{dn}^l(\theta_r)$ — моменты на валу двигателя в режиме перекрытия фазных обмоток при нарастающем и спадающем отрезках времени θ_{ov1} и θ_{ov2} соответственно; T_e — средний задаваемый момент; θ_{on} — угол включения обмотки; θ_{off} — угол отключения обмотки.

Для расчета момента в период перекрытия обмоток (для линейной ФРМ) можно использовать следующие соотношения [8]:

$$\begin{aligned} f_{up}^l(\theta_r) &= \frac{T_e}{\theta_{ov}} \cdot (\theta_r - \theta_{on}), \\ f_{dn}^l(\theta_r) &= T_e - \frac{T_e}{\theta_{ov}} \cdot (\theta_r - \theta_{off}). \end{aligned} \quad (2)$$

Результаты расчета требуемого момента на обмотку записываются в табличную модель ВИД, которая содержит соответствующие значения тока фазы статора, необходимого для обеспечения заданного момента. Повысить эффективность приведенного класса методов можно при применении различных пропорционально-интегральных (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов (рис. 2) по формированию импульсного тока статора целесообразной формы.

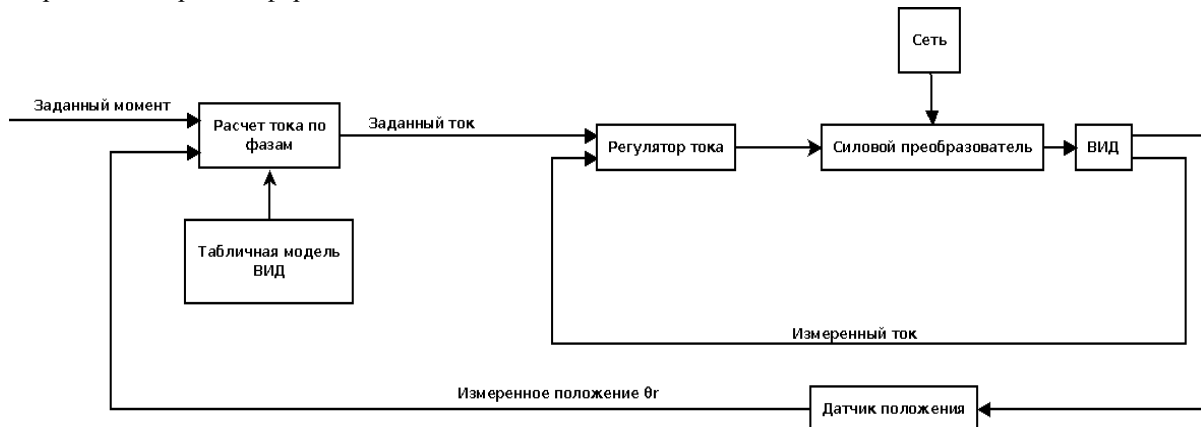


Рис. 2. Типовая схема системы управления с использованием ФРМ

Однако из-за существенных нелинейностей звеньев системы формирование момента на валу ВИД (с упомянутыми регуляторами) не дает приемлемого результата и появляется необходимость использования методов адаптивного или нейронечеткого управления [5]. Несмотря на простоту реализации данного метода, он не находит широкого применения, поскольку создаваемый момент на валу (при включении двух обмоток) является величиной, зависимой от влияния их взаимных индуктивностей. Для устранения приведенных выше недостатков используются

различные формы ФРМ, анализ и сравнение которых приведены в работе [9].

Альтернативным методом является также метод линеаризации управления по обратной связи [10–12], который часто используют при исследовании систем управления ВИД. Метод заключается в приведении нелинейной системы к линейной модели. При этом эффекты нелинейности и насыщения магнитопровода (стали) нивелируются за счет моделей, полученных из измеренных данных и моделей (рис. 3), построенных в системах конечноэлементного моделирования, например в программном пакете FEMM.

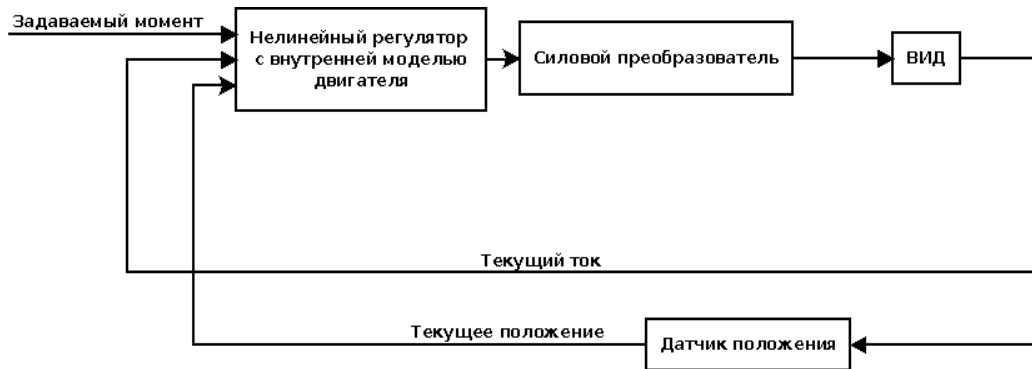


Рис. 3. Система управления с линеаризованной обратной связью

В данном случае необходимо располагать математическим описанием объекта управления в переменных состояния X «вход — выход», составленным как для динамической системы с сосредоточенными параметрами. При этом линеаризованные уравнения для многомерной системы записаны в стандартной форме:

$$\dot{x}' = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t), \quad (3)$$

$$y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \quad (4)$$

где $A(t)$ — матрица объекта размерностью (n, n) ; $B(t)$ — матрица управления или входа размерностью (n, m) ; $C(t)$ — матрица выхода размерностью (l, n) ; $D(t)$ — матрица компенсации размерностью (l, m) ; $U(t)$ — матрица вектора входа; m — число входов; l — число выходов; n — размерность вектора состояния.

Если определить решение однородного матричного уравнения, полученного из уравнения (3) при условии $U(t) = 0$, и все элементы матриц A, B, C, D не зависят от времени в частном случае, то уравнение (3) можно записать:

$$\dot{x}' = A \cdot x + B \cdot u, \quad (5)$$

а уравнение (4) с начальным условием $x(t)_{t=0} = x_0$ в виде:

$$y(t) = C \cdot x + D \cdot u. \quad (6)$$

В этом случае переходную матрицу, описывающую свободное движение системы, можно представить из уравнения (5) при $U(t) = 0$ выражением:

$$\dot{\varphi}(t) = A \cdot \varphi(t), \quad (7)$$

где $\varphi(t)$ — переходная матрица соответствует экспоненциальной функции вида

$$\varphi(t) = e^{At}. \quad (8)$$

Это позволяет записать общее решение уравнения (5) в виде:

$$x(t) = \varphi(t) \cdot x_0 + \int_0^t \varphi(t-\tau) \cdot B \cdot u(\tau) d\tau. \quad (9)$$

С учетом выражения (8) можно записать:

$$x(t) = \varphi(t) \cdot x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} (t-\tau) \cdot B \cdot u(\tau) d\tau, \quad (10)$$

где τ — выбранное приращение времени. При $U(\tau) = 0$ решением однородного уравнения является соотношение

$$\dot{x}' = A \cdot x, \quad (11)$$

что позволяет записать:

$$x(t) = \varphi(t) \cdot x_0 = e^{At} \cdot x_0, \quad (12)$$

а также использовать выражение (12) в матричной форме для выполнения моделирования.

Основной сложностью данного метода является построение нелинейной модели таким образом, чтобы линейное входное воздействие $U(t)$ соответствовало линейному изменению внутреннего состояния ВИД и были созданы условия исследования нелинейной модели по выбранным критериям устойчивости. Анализ такого подхода к поиску модели усложняется из-за ряда особенностей, связанных с высокими требованиями к точности представления модели ВИД, измерениям параметров тока и положения фазного угла ротора.

В настоящее время приобретают особую значимость также методы исследования ВИД, основанные на управ-

лении магнитным потоком [13, 14] при бездатчиковом управлении ВИД. Усовершенствованная математическая модель такого управления учитывает взаимную индуктивность обмоток [11] и оценку значения момента на валу двигателя из соотношения:

$$T \approx i \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \theta}, \quad (13)$$

где T — момент на валу ВИД; i — ток обмоток; λ — потокосцепление; θ — угловое положение фазы ротора.

При этом примерная оценка потокосцепления определяется из выражения

$$v_j = R_s \cdot i_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad (14)$$

преобразование которого позволяет выделить оценку потока в виде

$$\lambda = \int (V - i \cdot R) \cdot dt. \quad (15)$$

После подстановки в (14) значения λ из (15) можно определить значение момента T на валу ВИД. Вычислительные процессы по приведенным уравнениям хорошо могут быть реализованы с помощью современной микропроцессорной техники и сигнальных процессоров. Такой подход к поиску возможности формирования безпульсирующего момента на валу позволяет выполнять управления ВИД без датчика поворота, с помощью зондирующих импульсов [15]. Однако такой подход не позволяет реализовать предполагаемую возможность по снижению пульсаций момента ВИД, а неопределенное состояние системы при запуске ВИД вызывает трудности в применении.

По мнению авторов, наибольшую привлекательность для математического исследования ВИД имеет **метод прямого управления моментом**, основанный на оценке текущего момента двигателя по данным датчиков: магнитного потока, положения, момента, тока, а также его коррекции по критерию минимума квадратичной ошибки. Структурная схема системы управления, реализующей указанный метод, приведена на рис. 4.

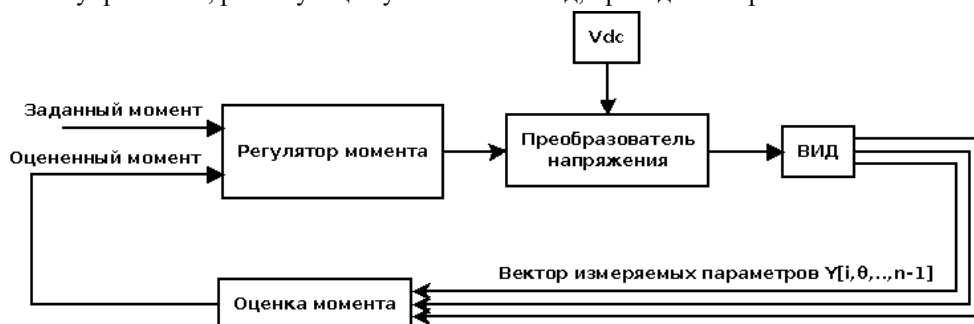


Рис. 4. Схема организации прямого управления моментом ВИД

При работе данной схемы вектор измеряемых параметров $Y[i, \theta, \dots, n-1]$ поступает на блок «Оценка момента» на валу двигателя, результирующий сигнал с которого поступает на регулятор момента [5, 16]. Интерес представляет подход к оценке момента на валу ВИД с использованием характеристик $T(\theta, i)$, которые хранятся в памяти контроллера. Типичная поверхность характеристик $T(\theta, i)$, построенная для ВИД (схема 6/4), приведена на рис. 5.

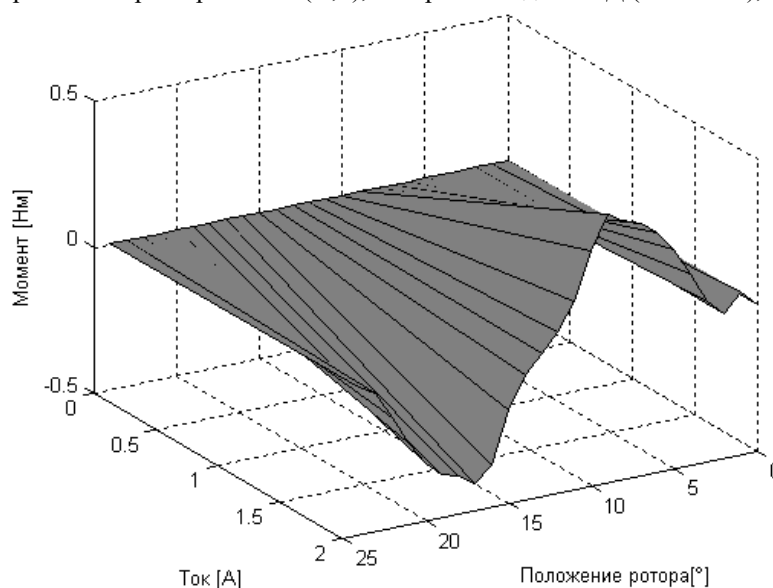


Рис. 5. Поверхность характеристик $T(\theta, i)$

Применение расширенного вектора измеряемых параметров $Y[i, \theta, \dots, n-1]$ для оценки момента позволяет, не используя косвенные параметры, точнее оценить фактическую величину текущего момента на валу ВИД в сравнении с методами непрямого управления. Следует отметить, что с увеличением размерности $Y[i, \theta, \dots, n-1]$ появляется возможность (без изменения структуры системы управления) более точно оценивать пульсации момента от действия внешних сил и управлять значением формируемого момента на валу ВИД. Однако применение метода возможно при соответствии характеристик вычислительных средств повышенным требованиям: необходим достаточно большой объем памяти контроллера, в котором хранятся данные для реализации функции момента двигателя, а также высокая вычислительная нагрузка на управляющую микропроцессорную систему.

Выводы. Выполненный обзор существующих подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента при исследовании вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования позволяет сделать следующие выводы.

— Существующие подходы к оценке возможности формирования момента на валу без пульсаций не учитывают влияние массы ротора на прогиб вала (изменение воздушного зазора между статором и ротором), что может существенно изменить результаты моделирования.

— При формировании результирующего момента на валу не учитывается возможность управления коэнергией электромеханического преобразователя, что снижает эффективность результатов оценки пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования.

— Приемлемые методы (нейросетевые и нейронечеткие) снижения пульсаций момента предполагают оффлайн обучение. Для них точность модели ВИД, на которой происходит обучение метода, является важным фактором. Однако в рассмотренных статьях не учитываются эффекты остаточной намагниченности ротора и статора, а также провисания ротора под действием силы тяжести, которые имеют значительное влияние на пульсации момента [3].

— Остаточная намагниченность ротора учитывается в работе [6]. Однако предлагаемая система управления занижает среднее значение формируемого момента на валу ВИД за цикл работы фазной обмотки.

Библиографический список

1. Карнаухов, Н. Ф. Коррекция механических характеристик частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Д. А. Статовой // Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2013): мат-лы V междунар. науч.-техн. конф. / Кабардино-балкарский университет. — Нальчик, 2013. — С. 433.
2. Карнаухов, Н. Ф. Математическая модель вентильно-реактивного двигателя мехатронной системы при одноимпульсном питании / Н. Ф. Карнаухов, Г. В. Дзаян, Н. В. Русин // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21): сб. тр. XXI междунар. науч. конф. — Саратов, 2008. — Секц. 9, 14. — Т. 7. — С. 25–27.
3. Петрушин, А. Д. Оценка влияния неравномерности воздушного зазора на величину сил одностороннего притяжения ротора к статору вентильно-индукторной электрической машины / А. Д. Петрушин, Е. Е. Илясова // Вестник ВЭЛНИИ. — 2011. — № 2. — Р. 84–93.
4. Suryadevara, R. Control techniques for torque ripple minimization in switched reluctance motor: An overview / R. Suryadevara, B.-G. Fernandes // IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems: conf. proc. — Peradeniya, 2013. — P. 24–29.
5. Mousavi-Aghdam, S. R. A new method to reduce torque ripple in switched reluctance motor using fuzzy sliding mode / S.-R. Mousavi-Aghdam, M.-B.-B. Sharifian, M.-R. Banaei // Iranian journal of fuzzy systems. — 2012. — Vol. 9, № 1. — P. 97–108.
6. Divandari, M. Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control / M. Divandari, A. Dadpour // 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications — INDUSCON 2010. — Sao Paulo, 2010. — P. 1–6.
7. Srinivas, P. DTC of switched reluctance motor drive using simplified torque equation / P. Srinivas // International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering. — 2015. — Vol 4, № 1. — P. 92–95.
8. Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor / H.-S. Ro [et al.] // Journal of Electrical Engineering & Technology. — 2015. — Vol. 10, № 1. — P. 118–127.
9. Xue, X.-D. Evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization of switched reluctance motor drives in electric vehicles / X.-D. Xue, K.-W.-E. Cheng, N.-C. Cheung // Power Engineering Conference. — Sydney, 2008. — P. 1–6.

10. Feedback linearizing control of switched reluctance motors / M. Ilic-Spong [et al.] // IEEE Transactions on Automatic Control. — 1987. — Vol. 32, № 5. — P. 371—379.
11. Bae, H.-K. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance / H.-K. Bae, R. Krishnan // IEEE Industrial Electronics Conference. — Nagoya, 2000. — Vol. 1. — P. 369–374.
12. Panda, S.-K. Application of nonlinear control to switched reluctance motors: a feedback linearisation approach / S.-K. Panda, P.-K. Dash // IEEE Proceedings — Electric Power Applications. — 1996. — Vol. 143, № 5. — P. 371–379.
13. Lovatt H.-C. A flux controller that improves drive system performance by accounting for magnetic circuit saturation / H.-C. Lovatt // Power Electronics and Applications : Fifth European Conference. — Brighton, 1993. — P. 163–167.
14. Barrass, P.-G. Flux and torque control of switched reluctance machines / P.-G. Barrass, B.-C. Mecrow // IEEE Proceedings — Electric Power Applications. — 1998. — Vol. 145, № 6. — P. 519–527.
15. Петрушин, А. Д. Бездатчиковый пуск вентильно-индукторных электрических машин / А. Д. Петрушин, М. В. Чавычалов // Вестник РГУПС. — 2012. — № 3. — P. 34–38.
16. Castro S.-J., Andrada G.-P., Blanqué M.-B. Minimization of torque ripple in switched reluctance motor drives using an enhanced direct instantaneous control // International Conference on Electrical Machines. — Marsella, 2012. — P. 1021–1026.

References

1. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Statovoy, D.A. Korrektsiya mekhanicheskikh kharakteristik chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Correction of mechanical characteristics of the production machine variable-frequency drive in the low velocity zone of the actuator movement.] Nauka, tekhnika i tekhnologiya KhKhI veka (NTT-2013): mat-ly V mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Science, processes and technology of the XXI century (NTT-2013): Proc. V Int. Sci.-Eng. Conf.] Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 2013, p. 433 (in Russian).
2. Karnaukhov, N.F., Dzayan, G.V., Rusin, N.V. Matematicheskaya model' ventil'no-reaktivnogo dvigatelya mekhatronnoy sistemy pri odnoimpul'snom pitanii. [Mathematical model of valve-jet engine of mechatronic system at single-pulse power supply.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-21) : sb. tr. XXI mezhdunar. nauch. konf. [Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-21): Proc. XXI Int. Sci. Conf.] Saratov, 2008, sections 9, 14, vol. 7, pp. 25–27 (in Russian).
3. Petrushin, A.D., Ilyasova, E.E. Otsenka vliyaniya neravnomernosti vozdušnogo zazora na velichinu sil odnostonnogo prityazheniya rotora k statoru ventil'no-induktornoy elektricheskoy mashiny. [Evaluation of air gap unevenness influence on magnitude of forces of one-way pull of rotor to the stator of valve-inductor of valve-inductor electrical machine.] Vestnik VELNII, 2011, no. 2, pp. 84–93 (in Russian).
4. Suryadevara, R., Fernandes, B.-G. Control techniques for torque ripple minimization in switched reluctance motor: An overview. IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems: conf. proc. Peradeniya, 2013, pp. 24–29.
5. Mousavi-Aghdam, S. R., Sharifian, M.-B.-B., Banaei, M.-R. A new method to reduce torque ripple in switched reluctance motor using fuzzy sliding mode. Iranian journal of fuzzy systems, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 97–108.
6. Divandari, M., Dadpour, A. Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications — INDUSCON 2010. Sao Paulo, 2010, pp. 1–6.
7. Srinivas, P. DTC of switched reluctance motor drive using simplified torque equation. International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering, 2015, vol 4, no. 1, pp. 92–95.
8. Ro, H.-S., et al. Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 118–127.
9. Xue, X.-D., Cheng, K.-W.-E., Cheung, N.-C. Evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization of switched reluctance motor drives in electric vehicles. Power Engineering Conference. Sydney, 2008, pp. 1–6.
10. Ilic-Spong, M. et al. Feedback linearizing control of switched reluctance motors. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, vol. 32, no. 5, pp. 371–379.
11. Bae, H.-K., Krishnan, R. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual

inductance. IEEE Industrial Electronics Conference. Nagoya, 2000, vol. 1, pp. 369–374.

12. Panda, S.-K., Dash, P.-K. Application of nonlinear control to switched reluctance motors: a feedback linearisation approach. IEEE Proceedings — Electric Power Applications, 1996, vol. 143, no. 5, pp. 371–379.

13. Lovatt H.-C. A flux controller that improves drive system performance by accounting for magnetic circuit saturation. Power Electronics and Applications : Fifth European Conference. Brighton, 1993, pp. 163–167.

14. Barrass, P.-G., Mecrow, B.-C. Flux and torque control of switched reluctance machines. IEEE Proceedings — Electric Power Applications, 1998, vol. 145, no. 6, pp. 519–527.

15. Petrushin, A.D., Tchavychalov, M.V. Bezdatchikovyy pusk ventil'no-induktornykh elektricheskikh mashin. [Sensorless start of switched reluctance electric machines.] Vestnik RGUP, 2012, no. 3, pp. 34–38 (in Russian).

16. Castro S.-J., Andrada G.-P., Blanqué M.-B. Minimization of torque ripple in switched reluctance motor drives using an enhanced direct instantaneous control. International Conference on Electrical Machines. Marsella, 2012, pp. 1021–1026.

Поступила в редакцию 21.01.2016

Сдана в редакцию 22.01.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.362.001.573

DOI 10.12737/19691

Моделирование процесса сепарации измельченного соломистого вороха в пневмосепараторе с тремя пневмоканалами*

Ю. И. Ермольев¹, А. А. Дорошенко², С. В. Белов^{3**}^{1,2} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация³ ООО «Донская гофротара», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Modeling of milled straw heap separation in air-flow classifier with three pneumatic ducts***

Y. I. Yermolyev¹, A. A. Doroshenko², S. V. Belov^{3**}^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation³ «Donskaya Gofrotara» LLC, Rostov-on-Don, Russian Federation

Предметом настоящего исследования является многомерный анализ процесса пневмосепарации соломистого вороха с заданным фракционным составом, поступающего на очистку после барабанного разрушителя. Цель работы — выявление закономерностей процесса пневмосепарации соломистого вороха тремя пневмоканалами при вариации кинематических параметров пневмосепараторов. Метод исследования — аналитическое моделирование. Оценено влияние на процесс сепарации вероятностных характеристик подачи гетерогенного вороха, распределения скоростей воздушного потока по ширине пневмосепараторов и плотностей вероятности скоростей витания компонентов вороха. Рассмотрен процесс пневмосепарации вороха на каждом участке пневмоканала. С этой целью использовались математические выражения, усредняющие показатели пневмосепарации последовательно функционирующих трех пневмоканалов и стохастическая квазистатистическая математическая модель процесса функционирования пневмосепаратора с тремя последовательными пневмоканалами. Приведены результаты параметрического синтеза пневмосепаратора, технологические показатели его функционирования. Показаны долевые составляющие компонентов вороха и их процентные доли в каждой выделенной фракции. Выявлена возможность пневмосепарации измельченного соломистого вороха на задаваемые фракции при заданной производительности 0,6–0,7 кг/м·с. Установлено, что при рациональном функционировании пневмосепаратора содержание соломы в деловой фракции — 97,03 %. При этом содержание зерна минимально (0,03 %), минеральные примеси отсутствуют. Выявлено, что пневмосепаратор с тремя последовательными пневмоканалами достаточен для сепарации измельченного соломистого вороха с задаваемыми агропоказателями.

Ключевые слова: пневмосепаратор, математическая модель, измельченный соломистый ворох, моделирование, показатели сепарации.

The research subject is a multivariate analysis of the air-flow classification process of the straw heap with a predetermined fractional composition supplied to the cleaning after the drum destroyer. The work objective is to identify patterns of the air separation using three pneumatic ducts with a linkage parameter variation. The investigative technique is an analytical modeling. The effect of probabilistic characteristics of the heterogenic thrashed heap supply, airflow velocity distribution by the separator width, and density function of heap components terminal velocity on the separation is evaluated. The air-flow classification process on each section of the pneumatic duct is considered. To this end, the mathematical expressions averaging the air classification indicators of the consistently functioning three pneumatic ducts and a stochastic quasistatic mathematical model of the separator operation with three pneumatic ducts in series are used. The results of the separator parametric synthesis and its technological parameters are presented. The fractional constituents of the heap components and their percent-sizes in each air-classified fraction are shown. The possibility of the air-flow classification of the crushed straw heap in the predetermined factions at the preset productivity of 0.6-0.7 kg/m·s is revealed. It is found that under the rational functioning of the air separator, the straw content in the service faction is 97.03%. In this case, the minimum grain content is 0.03%, and mineral impurities are 0%. It is revealed that the air separator with three pneumatic ducts in series is sufficient for separating the crushed straw heap with the predetermined agro-technical requirements.

Keywords: air-flow classifier, mathematical model, milled straw heap, modeling, separation characteristics.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: ermolevui@yandex.ru, sad133@yandex.ru, butovchenkoav@yandex.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Использование измельченной соломы [1] для получения из нее целлюлозного полуфабриката требует соответствующей технологической обработки. В частности, необходимо добиться ограничения длины основной массы соломы в пределах 30–50 мм [2, 3, 4]. Таким образом, ставится задача по сепарации измельченной соломы из исходной измельченной солоистой массы с известным фракционным составом и технологическими свойствами компонентов.

Анализ этих технологических свойств позволил принять гипотезу о возможной сепарации гетерогенного вороха в пневмосепараторе с одним или несколькими последовательно функционирующими вертикальными пневмоканалами с выделением деловой солоистой фракции [5, 6].

При многомерном анализе этой технологической операции учитывали вероятностные характеристики:

- ввода солоистого вороха в вертикальные пневмоканалы;
- распределения скоростей воздушного потока по ширине пневмоканалов;
- распределения скоростей витания всех компонентов, входящих в состав солоистого вороха [6–9].

Постановка задачи. Моделирование процесса сепарации измельченного солоистого вороха в пневмосепараторе с тремя последовательными пневмоканалами.

Методы исследований. Моделирование на ЭВМ процесса функционирования пневмосепаратора, многомерный анализ показателей сепарации.

Моделирование процесса сепарации. В качестве исходного вороха взят измельченный на специальном стенде солоистый ворох из тюков соломы, полученных после зерноуборочного комбайна. Измельчающее устройство предварительно настроено для заданной длины резки соломы — 40 мм [6]. Состав вороха представлен в табл. 1.

Таблица 1

Технологические свойства и подача измельченного солоистого вороха в пневмосепаратор

№	Компоненты исходного вороха	Содержание*	Подача, кг/м·с
1	Щуплое зерно	0,000615	0,000418
2	Дробленое зерно	0,000861	0,000585
3	Корзинки осота	0,0054	0,003672
4	Колоски	0,0036	0,002448
5	Минеральные примеси	0,0123	0,008364
6	Полова	0,0203	0,013804
7	Зерно толщиной более 2,2 мм	0,009594	0,006524
8	Семена сорняков	0,0006	0,000408
9	Зерно толщиной от 1,7 до 2,2 мм	0,00123	0,000836
10	Сухая трава	0,0162	0,011016
11	Осты	0,0004	0,000272
12	Солома $l = 20$ мм	0,018578	0,012633
13	Солома $l = 30$ мм	0,074312	0,050532
14	Солома $l = 40$ мм	0,538762	0,366358
15	Солома $l = 50$ мм	0,204358	0,138963
16	Солома $l = 60$ мм	0,046445	0,031583
17	Солома $l = 70$ мм	0,023223	0,015791
18	Солома $l = 80$ мм	0,023223	0,015791
19	Солома	0,9289	0,631652
*Безразмерная величина.			

Плотности вероятности скоростей витания компонентов солоистого вороха, описанные уравнениями регрессии [6], представлены в табл. 2.

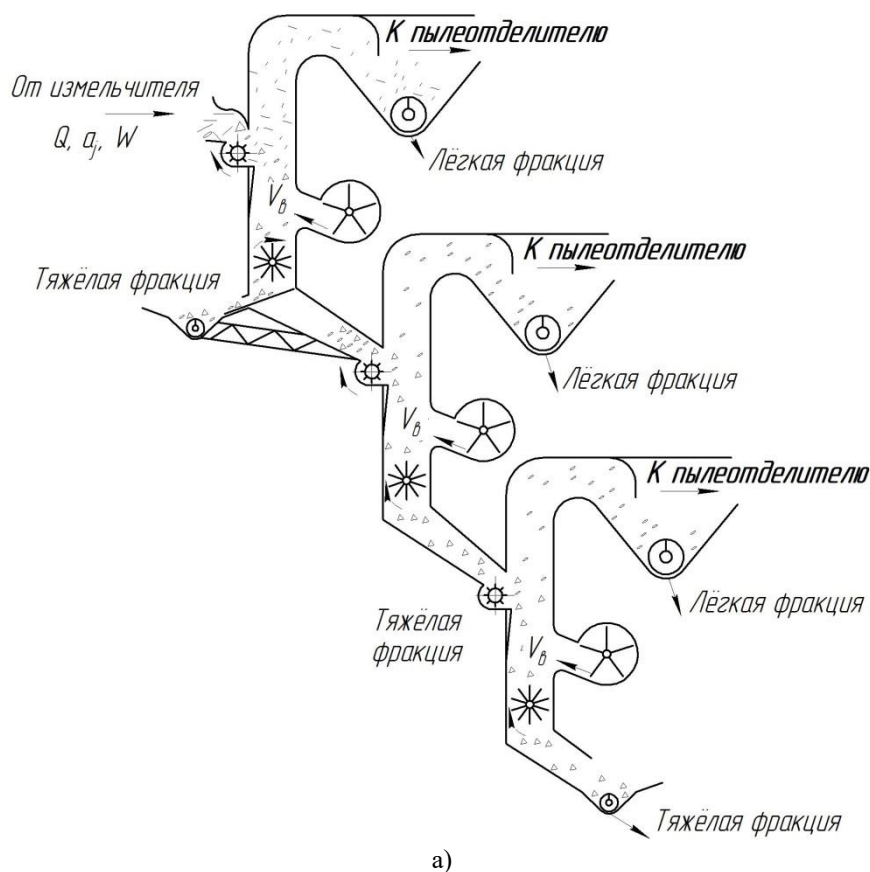
Таблица 2

Величины коэффициентов для уравнения регрессии, описывающего плотности вероятностей скоростей витания компонентов соломистого вороха

$$f(V) = C_1 \cdot V^4 + C_2 \cdot V^3 + C_3 \cdot V^2 + C_4 \cdot V + C_0$$

№	Компоненты вороха	Скорости витания		Коэффициенты при переменных				
		V_{min}	V_{max}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_0
1	Щуплое зерно	5,18	7,052	-0,0613	0,6892	-1,0939	-1,844	4,3889
2	Дробленое зерно	5,68	7,273	0,1094	-2,357	15,902	-34,215	22,556
3	Корзинки осота	3,32	5,48	0,0657	-1,2994	7,5321	-11,603	11,028
4	Колоски	7,57	10,144	0,0721	-1,6725	11,868	-25,888	18,194
5	Минеральные примеси	8,05	11,02	0,0029	-0,3504	3,9323	-9,4644	7,7778
6	Полова	1,12	3,487	-0,0568	1,3939	-12,311	42,655	-29,167
7	Зерно толщиной более 2,2 мм	7,1	9,107	0,0248	-0,5997	4,0389	-6,0867	3,3889
8	Семена сорняков	2,8	6,967	-0,0412	0,7939	-5,6101	18,221	-10,722
9	Зерно толщиной 1,7–2,2 мм	5,92	8,09	0,0248	-0,5997	4,0389	-6,0867	6,3889
10	Сухая трава	2,5	4,3	0,0165	-0,4223	2,8339	-3,9774	8,2222
11	Осты	2,1	3,144	0,0721	-1,6725	11,868	-25,888	18,194
12	Солома $l = 20\text{мм}$	2,5	3,3	7,2938	-86,831	347,81	-533,35	273,41
13	Солома $l = 30\text{мм}$	3	3,8	7,2979	-87,993	358,02	-559,26	290,26
14	Солома $l = 40\text{мм}$	3,45	4,25	8,6854	-103,25	414,89	-646,85	333,53
15	Солома $l = 50\text{мм}$	3,85	4,65	4,8667	-57,01	221,23	-319,29	156,86
16	Солома $l = 60\text{мм}$	4,2	5	5,5583	-65,59	258,76	-387,19	198,46
17	Солома $l = 70\text{мм}$	4,5	5,3	6,2542	-73,938	293,12	-443,92	230,15
18	Солома $l = 80\text{мм}$	4,75	5,55	5,9063	-69,626	275,11	-413,21	210,15

В качестве объекта исследования принят процесс сепарации соломистого вороха в пневмосепараторе с тремя последовательными вертикальными пневмоканалами с нагнетательным воздушным потоком (рис. 1).



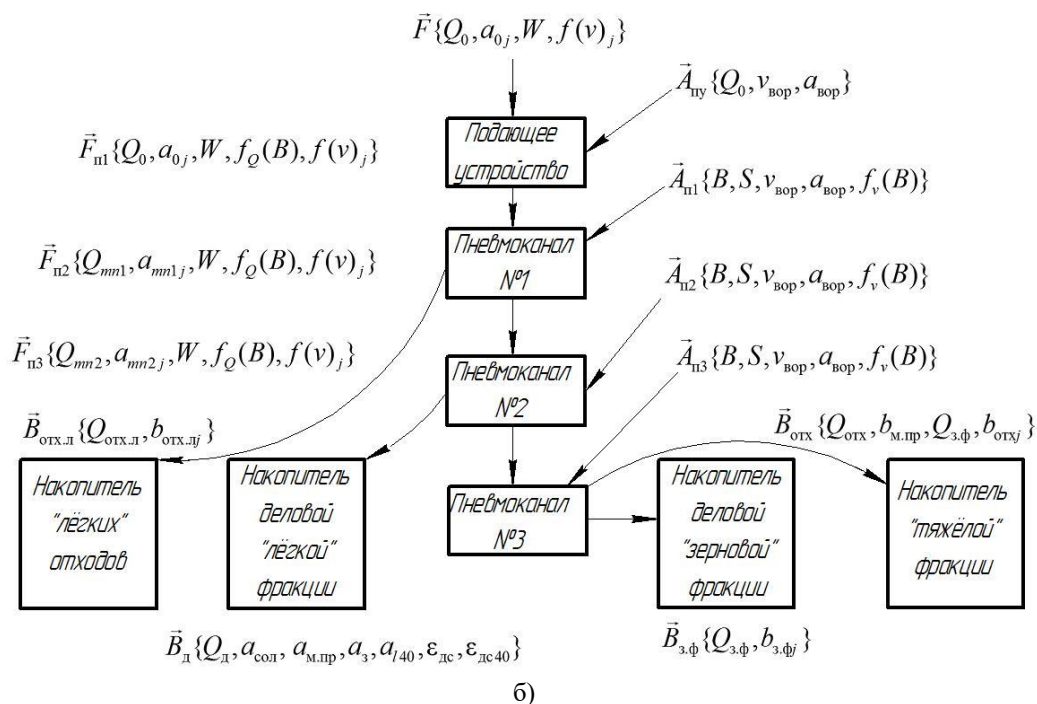
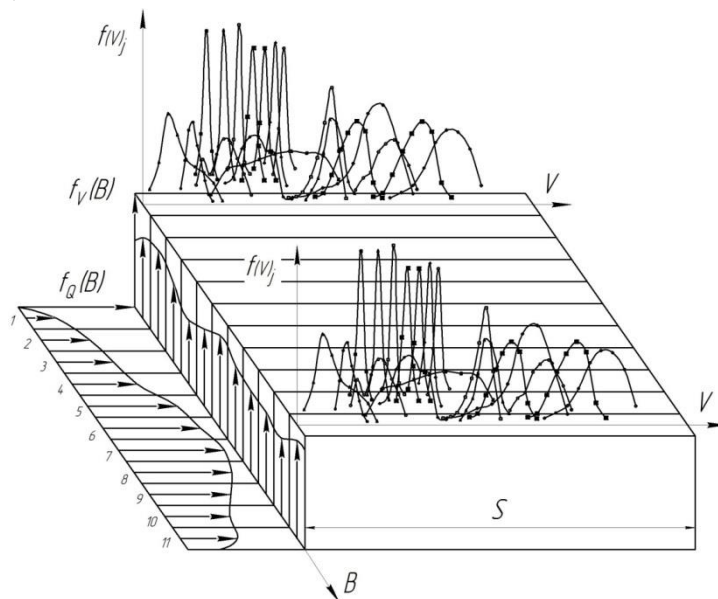


Рис. 1. Схемы пневмосепаратора с тремя пневмоканалами: общая (а), структурная и расчетная (б)

В соответствии с требованиями по агропоказателям функционирования пневмосепаратора с тремя пневмоканалами задача первого пневмоканала — выделить из исходного измельченного соломистого вороха легкие сорные компоненты со скоростями витания 2–4 м/с.

Для оценки показателей пневмосепарации, в отличие от существующих теорий пневмосепарации [10–13], в каждом пневмоканале использовалась известная математическая модель [5]. При этом подача Q соломистого вороха в каждый пневмоканал и содержание a_j в них j -х компонентов определялись при моделировании в соответствии со структурной расчетной схемой (рис. 1, б), где показаны векторы \vec{F} , \vec{F}_{n1} , \vec{F}_{n2} , \vec{F}_{n3} входных воздействий, векторы \vec{A}_{ny} , \vec{A}_{n1} , \vec{A}_{n2} , \vec{A}_{n3} управляющих воздействий и векторы $\vec{B}_{отх.л}$, \vec{B}_0 , $\vec{B}_{3.ф}$, $\vec{B}_{отх}$, характеризующие выходные фракции отсепарированного соломистого вороха.

Для учета вероятностных характеристик $f_v(B)$, $f_Q(B)$ условно разделим каждый пневмоканал по ширине B на равные участки ($P = 1, 2, \dots, e$) (рис. 2). Количество участков определяется из условий точности расчетных показателей процесса пневмосепарации в зависимости от числа e .

Рис. 2. Вероятностные характеристики распределения воздушного потока $f_v(B)$, подачи соломистого вороха $f_Q(B)$ по ширине B пневмоканала и плотности вероятностей $f(V_j)$ распределения скоростей витания компонентов соломистого вороха на участках 1, 2, ..., e ширины пневмоканала

Для этих условий оцениваются показатели сепарации соломистого вороха на каждом p -м участке ширины B пневмоканала (рис. 2). На каждом участке на обрабатываемый материал воздействует скорость воздушного потока V_p (табл. 3), подача Q_p обрабатываемого материала [6] (табл. 1, 2). Вероятностные характеристики $f(V)_j$ скоростей витания j -х компонентов соломистого вороха приняты постоянными для каждого p -го участка.

Таблица 3

Распределение рациональных скоростей воздушных потоков пневмосепаратора с тремя пневмоканалами

№ пневмоканала	p -й участок ширины B пневмоканала										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,54	3,17	2,43	1,47	2,33	3,36	2,83	2,61	2,66	2,41	3,67
2	5,34	5,97	5,23	4,27	5,13	6,16	5,63	5,41	5,46	5,21	6,47
3	8,39	9,02	8,28	7,32	8,18	9,21	8,68	8,46	8,51	8,26	9,52

На первом этапе исследований использовались вертикальные пневмоканалы шириной $B = 1$ м, с нагнетательным воздушным потоком, формируемым центробежным вентилятором [14] с известной вероятностью $f_V(B)$ распределения скоростей воздушного потока по ширине B пневмоканалов (см. рис. 2). Плотность вероятности распределения $f_Q(B)$ принята в виде нормального закона:

$$f_Q(B) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_Q}} \cdot e^{-\frac{(Q - m_Q)^2}{2\sigma_Q^2}}, \quad (1)$$

где Q — случайная величина подачи соломистого вороха на интервале $O — B$, математическое ожидание случайной величины $m_Q = 2,27 \text{ м/м. час}$, дисперсия $\sigma_Q^2 = 1,838 [\text{кг/м.с}]^2$ (по результатам стендовых испытаний).

Анализ совмещенных кривых плотностей вероятностей $f(V)_j$, распределения скоростей витания j -х компонентов соломистого вороха и предварительные подсчеты определили необходимость выполнения агротребований к процессу пневмосепарации.

Полнота выделения легкой соломистой фракции в первом пневмоканале:

$$(1 - \varepsilon_{\Sigma j}) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где j — соломины заданной длины, $l = 30\text{--}50$ мм.

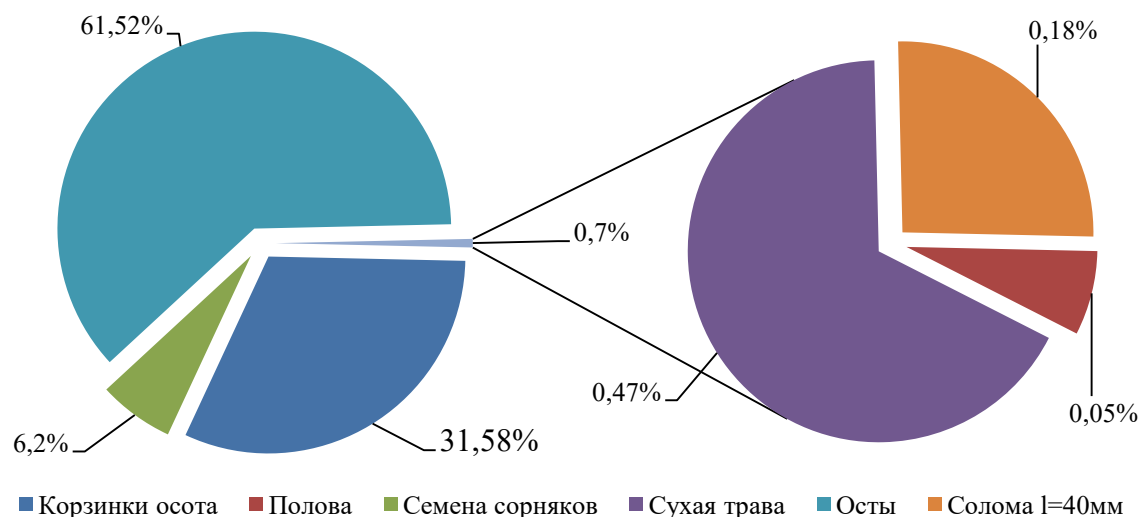
Содержание в легкой соломистой фракции минеральных примесей и зерна:

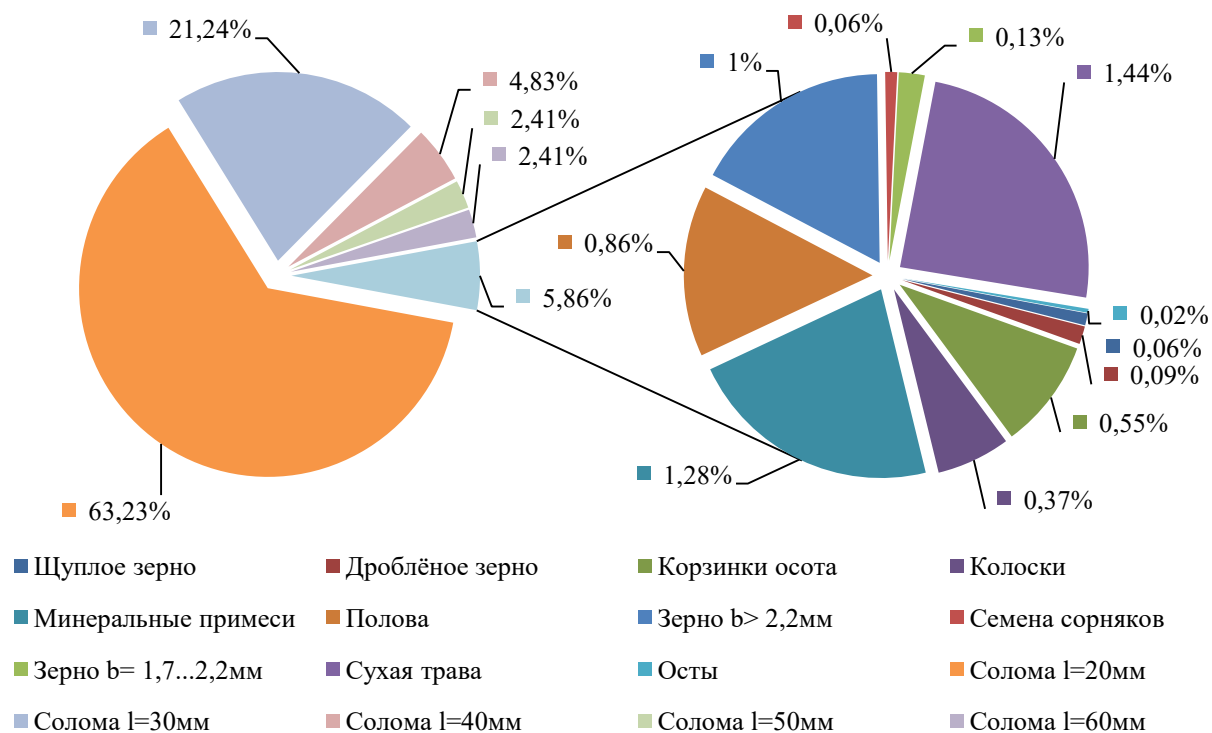
$$b_{n.\text{мин.}} \leq 1\%, \quad (3)$$

$$b_{n.\text{зер.}} \leq 0,5\%. \quad (4)$$

Первый пневмоканал пневмосепаратора с тремя пневмоканалами (рис. 1) функционировал, выделяя деловую легкую фракцию.

Результаты моделирования на ЭВМ процесса сепарации исходного измельченного соломистого вороха в первом пневмоканале пневмосепаратора с учетом выполнения указанных агротребований приведены на рис. 3.



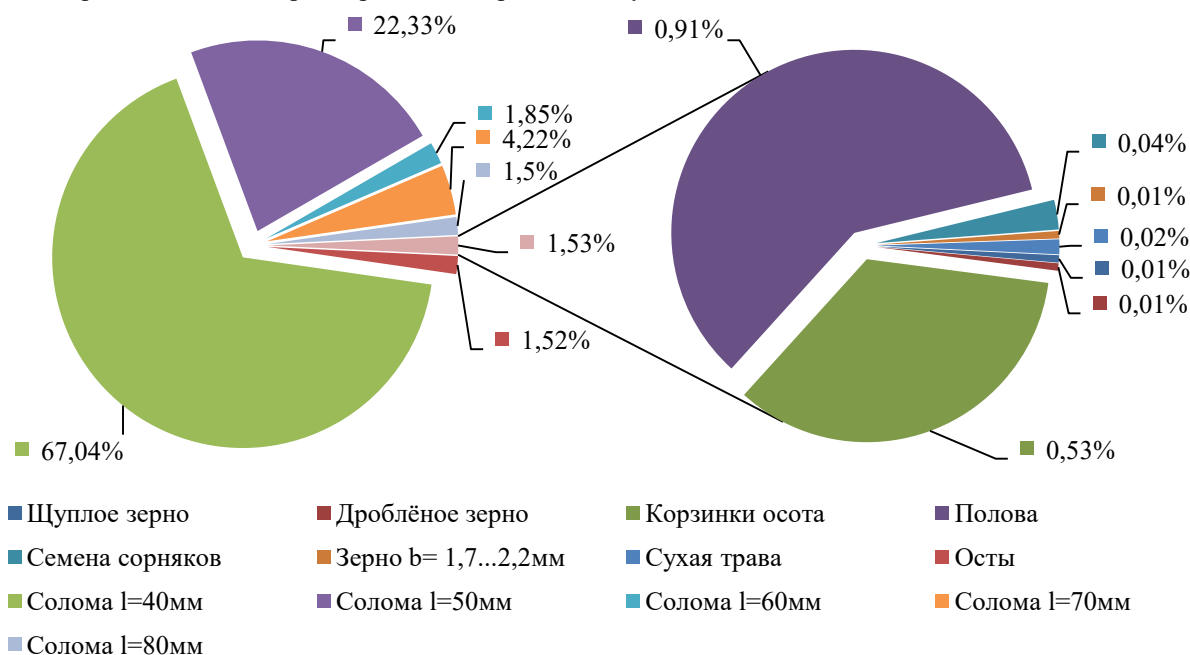


б)

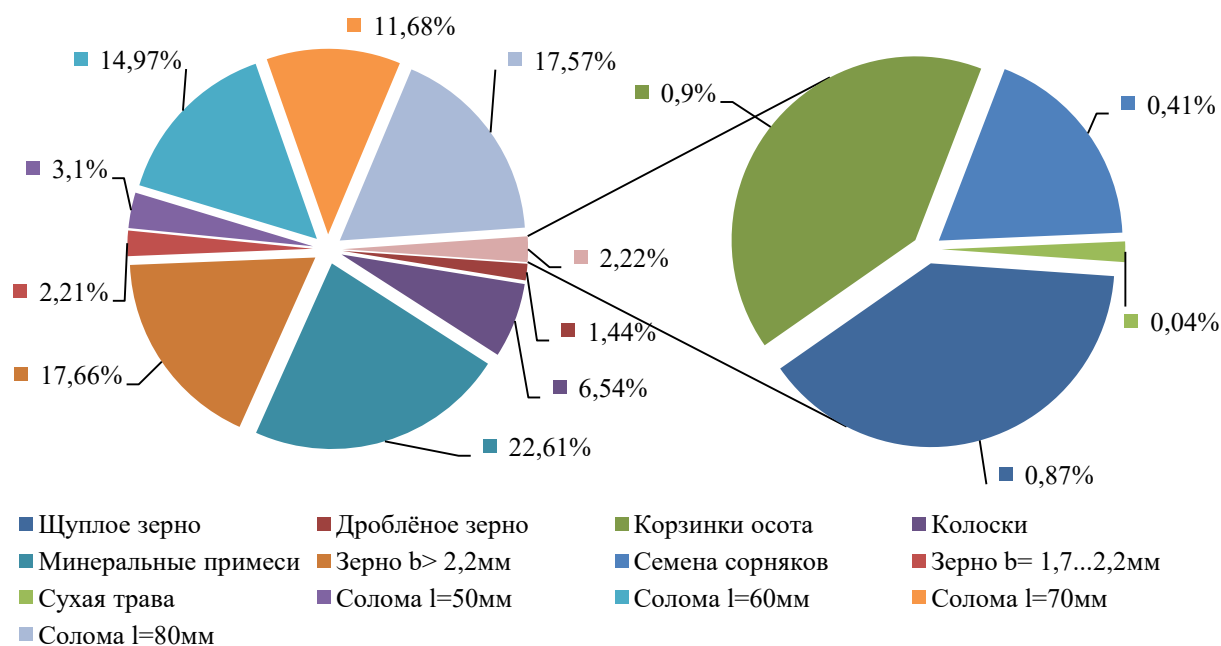
Рис. 3. Содержание j -х компонентов измельченного соломистого вороха в легкой (а) и тяжелой (б) фракциях первого пневмоканала пневмосепаратора с тремя пневмоканалами

Выявлены показатели удельной подачи на 1 м ширины пневмоканала за единицу времени. При выходе всех компонентов в легкую фракцию первого пневмоканала это 0,0258 кг/м·с, или 0,093 т/м·ч, в течение 8-часовой смены — 0,743 т/м. Полнота прохода всех соломин разной длины в легкую фракцию — 2,514 %, в тяжелую — 94,485 %. Вывод всех компонентов в тяжелую фракцию — 0,6047 кг/м·с, или 2,177 т/м·ч, в течение 8-часовой смены — 17,42 т/м.

Второй пневмоканал выделяет из тяжелой промежуточной фракции первого пневмоканала деловую легкую в соответствии с принятыми агротребованиями (рис. 4). Для реализации агротребований моделирование процесса пневмосепарации проведено для интервала рабочих скоростей воздушного потока во 2-м пневмоканале от 2,5 до 5 м/с.



а)



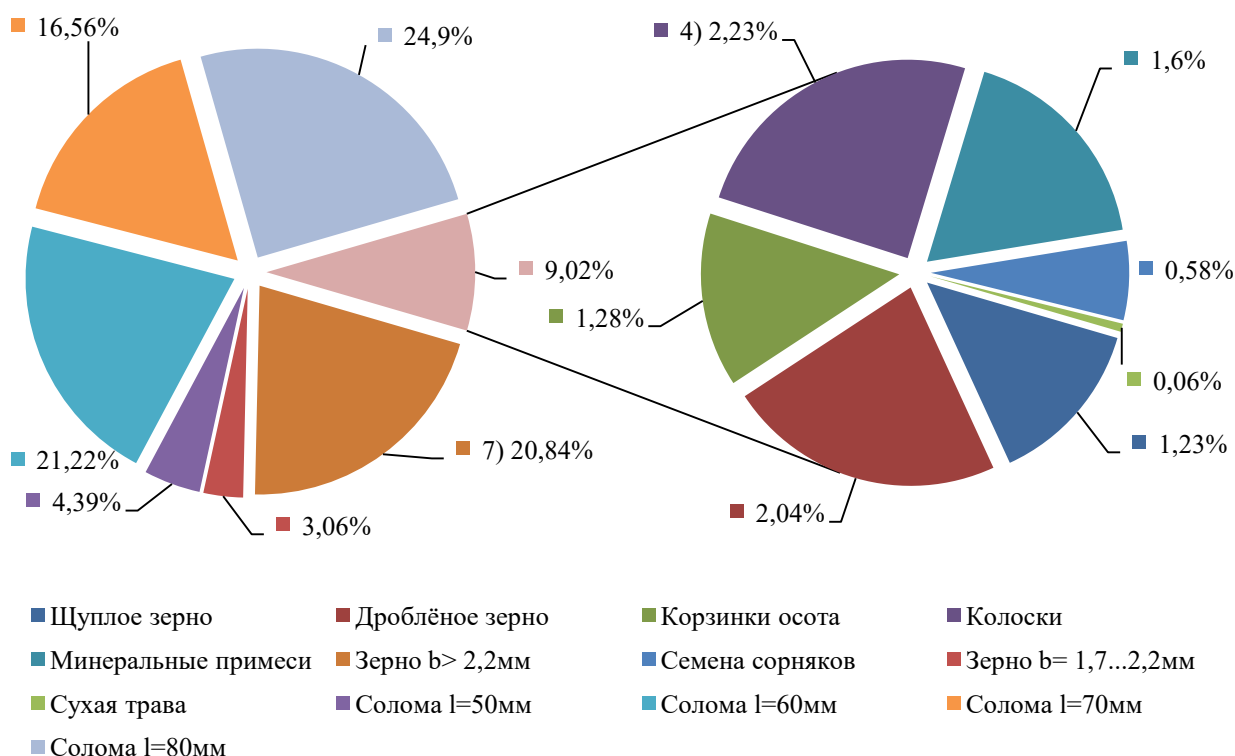
б)

Рис. 4. Содержание j -х компонентов соломистого вороха в легкой (а) и тяжелой (б) фракциях 2-го пневмоканала пневмо-сепаратора с тремя пневмоканалами

Установлено, что выход всех компонентов в деловую легкую фракцию — 0,617 кг/м³, или 2,221 т/м³, в течение 8-часовой смены — 17,77 т/ч. Содержание зерна и зерновых примесей — 0,03 %, сорных минеральных примесей — 0 %. Эта легкая фракция на 97,03 % состоит из соломин. Полнота прохода всех соломин (от исходных) в эту деловую фракцию — 97,223 %.

Третий пневмоканал выделяет из тяжелой фракции, полученной во 2-м пневмоканале, легкую фракцию. Она содержит большую долю зерна, зерновых примесей и длинных соломин и может быть использована в кормопроизводстве.

Для реализации этой технологической операции при моделировании на ЭВМ использованы принятые агро-требования для 3-го пневмоканала. Результаты соответствующего моделирования приведены на рис. 5.



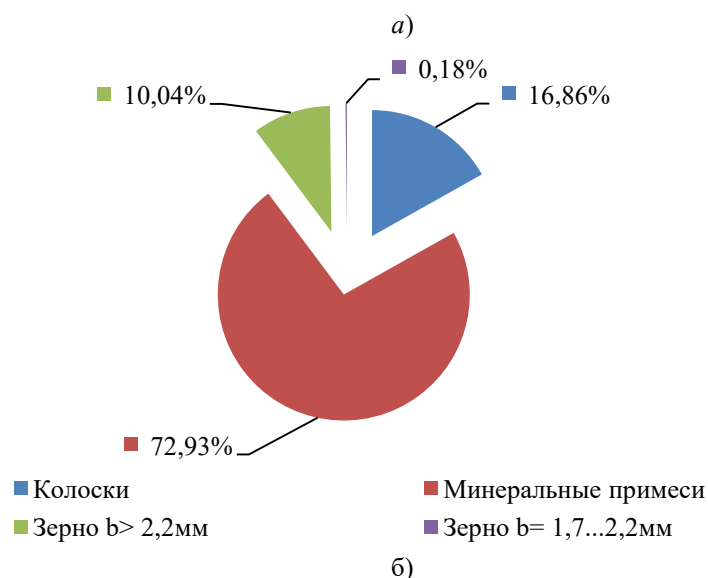


Рис. 5. Содержание j -х компонентов вороха в легкой (а) и тяжелой (б) фракциях 3-го пневмоканала пневмосепаратора с тремя пневмоканалами

Установлено, что выход всех компонентов в легкую (зерновую) фракцию 3-го пневмоканала — 0,026 кг/м·с, или 0,094 т/м·ч, в течение 8-часовой смены — 0,75 т/ч. Содержание зерна и зерновых примесей — 27,17 %. Выход зерна и зерновых примесей — 0,0071 кг/м·с, или 0,0255 т/м·ч, в течение 8-часовой смены — 0,2044 т/м. Выход сорных отходов (тяжелая фракция) — 0,0109 кг/м·с, или 0,0392 т/м·ч, в течение 8-часовой смены — 0,314 т/ч.

Выявлено, что использование пневмосепаратора с тремя пневмоканалами достаточно для сепарации измельченного соломистого вороха с задаваемыми агропоказателями.

Окончательные показатели функционирования пневмосепараторов будут уточнены по результатам стендовых экспериментов.

Обобщение результатов моделирования процессов функционирования рассмотренного пневмосепаратора приведено в обобщенной табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные расчетные показатели функционирования различных вариантов пневмосепараторов

Деловой продукт	Выход конечного делового продукта, $\frac{Q_g, \text{кг/м} \cdot \text{с}}{t / \text{м} \cdot \text{ч}}$		$\frac{0,61701}{2,22124}$
	Содержание зерна и зерновых примесей, $a_z, \%$		0,03
	Содержание минеральных примесей, $a_{м.пр}, \%$		0
	Содержание соломин, %	Всего, $a_{сол}, \%$	97,03
		Длиной 40 мм, $a_{l40}, \%$	67,04
	Полнота выделения соломин в деловую фракцию, %	Всего, ε_{dc}	97,22
		Длиной 40 мм, ε_{dc40}	100
Другой продукт	Выход зерновой фракции, $Q_{з.ф}$	Всего, $\frac{\text{кг/м} \cdot \text{с}}{t / \text{м} \cdot \text{ч}}$	$\frac{0,02604}{0,09374}$
		Доля зерна и зерновых примесей, $b_{з.ф}, \%$	В отходах: 27,170
	Выход отходов, $Q_{отх}$	Всего, $\frac{\text{кг/м} \cdot \text{с}}{t / \text{м} \cdot \text{ч}}$	$\frac{0,010907}{0,039264}$
		Доля минеральных примесей, $b_{м.пр}, \%$	72,930

Выводы. Основываясь на анализе расчетных показателей функционирования пневмосепаратора с тремя пневмоканалами, можно утверждать следующее. Применение данного оборудования позволяет выполнить все показатели с учетом принятых технологических критериев:

- обеспечивается выход в деловую фракцию 100 % измельченных соломин;
- создается зерновая фракция с большой долей выделенного зерна и зерновых примесей для возможного использования ее в кормопроизводстве;
- в отходы выделяется максимальный объем (72,93 %) сорных минеральных примесей.

Библиографический список

1. Параметрический анализ устройства для разрушения тюков соломы / Ю. И. Ермольев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — № 2 (81). — С. 108–116.
2. Recent innovations in analytical methods for the qualitative and quantitative assessment of lignin / J. S. Lupoi [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2015. — Vol. 49. — P. 871–906.
3. Padkho, N. A new design recycle agricultural waste materials for profitable use rice straw and maize husk in wall / N. Padkho // Procedia Engineering. — 2012. — Vol. 32. — P. 1113–1118.
4. Junjun, L. U. Flexural properties of Rice Straw and Starch Composites / L. U. Junjun, J. A. Chanjuan, H. E. Chunxia // AASRI Procedia. — 2012. — Vol. 3. — P. 89–94.
5. Моделирование процесса сепарации измельченного соломистого вороха в пневмосепараторе с двумя пневмоканалами / Ю. И. Ермольев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 10, № 2 (77). — С. 93–102.
6. Технологические операции и технические средства для современных технологий агропромышленного комплекса / под ред. Ю. И. Ермольева. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2012. — 158 с.
7. Ермольев, Ю. И. Моделирование воздушно-решетной зерноочистительной машины / Ю. И. Ермольев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 8 (51). — С. 1245–1254.
8. Ермольев, Ю. И. Энергосберегающие технологии сепарации зерновых отходов на предприятиях приема, переработки и хранения зерна / Ю. И. Ермольев, Г. И. Лукинов. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2007. — 234 с.
9. Проектирование технологических процессов и воздушно-решетных и решетных зерноочистительных машин / Ю. И. Ермольев [и др.] // Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2010. — 638 с.
10. Ермольев, Ю. И. Оценка основных закономерностей функционирования подсистемы решетный ярус — пневмосепаратор воздушно-решетной зерноочистительной машины / Ю. И. Ермольев, В. Д. Шафоростов, А. В. Бутовченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 4 (55). — С. 480–488.
11. Саитов, В. Е. Оптимизация конструктивно-технологических параметров первого пневмосепарирующего и дополнительного каналов замкнутой малогабаритной пневмосистемы / В. Е. Саитов, Р. Г. Гатауллин // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzglednieniem ochrony srodowiska I standardow UE : XIV Miedzynarodowa Konferencja Naukowa. — Warszawa, 2008. — P. 71–79.
12. Saitov, V. E. Determination technique of key parameters the closed small-sized grain separators [Электронный ресурс] / V. E. Saitov, V. G. Farafonov, A. N. Suvorov // International Journal Of Applied And Fundamental Research. — 2013. — № 2. — Режим доступа: URL:<http://www.science-sd.com/455-24135> (дата обращения 06.11.13).
13. Саитов, В. Е. Математическое моделирование разделения воздушным потоком отходов при очистке зерна / В. Е. Саитов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2007. — № 5. — С. 39–41.
14. Ермольев, Ю. И. Моделирование процесса функционирования центробежных вентиляторов в воздушно-решетной очистке зерноуборочного комбайна / Ю. И. Ермольев, Д. К. Муратов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 8 (59), вып. 1. — С. 1238–1246.

References

1. Yermolyev, Y.I., et al. Parametricheskiy analiz ustroystva dlya razrusheniya tyukov solomy. [Parametric analysis of straw wad destroyer.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 2 (81), pp. 108–116 (in Russian).
2. Lupoi, J.S., et al. Recent innovations in analytical methods for the qualitative and quantitative assessment of lignin. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 49, pp. 871–906.
3. Padkho, N. A new design recycle agricultural waste materials for profitable use rice straw and maize husk in wall. Procedia Engineering, 2012, vol. 32, pp. 1113–1118.
4. Junjun, L.U., Chanjuan, J.A., Chunxia, H.E. Flexural properties of Rice Straw and Starch Composites. AASRI Procedia, 2012, vol. 3, pp. 89–94.
5. Yermolyev, Y.I., et al. Modelirovanie protsesssa separatsii izmel'chennogo solomistogo vorokha v pnevmoseparatore s dvumya pnevmokanalami. [Modeling of milled straw heap separation in air-flow classifier with two pneumatic ducts.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 10, no. 2 (77), pp. 93–102 (in Russian).

6. Yermolyev, Y.I., ed. Tekhnologicheskie operatsii i tekhnicheskie sredstva dlya sovremennykh tekhnologiy agropromyshlennogo kompleksa. [Process operations and facilities for modern technologies of agroindustrial complex.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2012, 158 p. (in Russian)
7. Yermolyev, Y.I. Modelirovanie vozdušno-reshetnoy zernoochistitel'noy mashiny. [Air-and-screen cleaner modeling.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 8 (51), pp. 1245–1254 (in Russian).
8. Yermolyev, Y.I., Lukinov, G.I. Energoberegayushchie tekhnologii separatsii zernovykh otkhodov na predpriyatiakh priema, pererabotki i khraneniya zerna. [Energy-saving technologies of grain waste separation at the centres of grain receiving, processing and storage.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2007, 234 p. (in Russian).
9. Yermolyev, Y.I., et al. Proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov i vozdušno-reshetnykh i re-shetnykh zernoochistitel'nykh mashin. [Designing of processes and air-and-screen and sieve grain cleaners.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2010, 638 p. (in Russian).
10. Yermolyev, Y.I., Shaforostov, V.D., Butovchenko, A.V. Otsenka osnovnykh zakonomernostey funktsionirovaniya podsistemy reshetnyy yarus — pnevmoseparator vozdušno-reshetnoy zernoochistitel'noy mashiny. [Assessment of operation basic trends of screen tier-pneumatic separator of air-and-screen cleaner subsystems.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 4 (55), pp. 480–488 (in Russian).
11. Saitov, V.E., Gataullin, R.G. Optimizatsiya konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov pervogo pnevmosepariruyushchego i dopolnitel'nogo kanalov zamknutoy malogabaritnoy pnevmosistemy. [Optimization of design and technological parameters of the first and additional pneumatic-separating channels of the closed compact pneumatic system.] Problemy intensyfikatsii produktsii zhivotskikh i rastenstva z uwzględnieniem ochrony srodowiska i standardow UE: XIV Miedzynarodowa Konferencja Naukowa. Warszawa, 2008, pp. 71–79 (in Russian).
12. Saitov, V.E., Farafonov, V.G., Suvorov, A.N. Determination technique of key parameters the closed small-sized grain separators. International Journal Of Applied And Fundamental Research, 2013, no. 2. Available at: URL:<http://www.science-sd.com/455-24135> (accessed: 06.11.13).
13. Saitov, V.E. Matematicheskoe modelirovanie razdeleniya vozdušnym potokom otkhodov pri ochistke zerna. [Mathematical modeling of the airflow classification of the waste in grain cleaning.] Tractors and Agricultural Machinery, 2007, no. 5, pp. 39–41 (in Russian).
14. Yermolyev, Y.I., Muratov, D.K. Modelirovanie protsessa funktsionirovaniya tsentrobezhnykh ventilyatorov v vozdušno-reshetnoy ochistke zernouborochnogo kombayna. [Modeling of centrifugal fan performance in air-screen separator of combine harvester.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 8 (59), iss. 1, pp. 1238–1246 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.12.2015

Сдана в редакцию 09.12.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 625.7/8

DOI 10.12737/19694

Оценка динамической устойчивости в мониторинговой системе управления технико-экономической эффективностью дорожных машин*

К. П. Мандровский^{1}**¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация

Evaluation of dynamic stability in monitoring control system by the road machines technical-and-economic efficiency***

K. P. Mandrovskiy^{1}**¹Moscow Automobile and Road Construction University, Moscow, Russian Federation

Целью данного исследования является рассмотрение предпосылок к сокращению времени транспортных перемещений дорожно-строительных машин. На основе полученных сведений могут быть сформированы соответствующие рекомендации, используемые в мониторинговой системе управления эффективностью и техническом аудите. Отмечены недостатки существующих мониторинговых систем. Показано, что их применение для повышения технико-экономической эффективности дорожных машин не позволяет достичь контролируемых результатов. Техничко-экономический эффект целесообразно оценивать по критерию себестоимости единицы продукции с учетом затрат на владение. Для расчета такого критерия необходима исходная информация, которую можно получить путем мониторинга. При минимуме критерия имеет место ограничение по времени выполнения и по качеству работы. Рассмотрена возможность реализации ограничения по времени выполнения работы, которое во многом зависит от времени транспортных операций машин. Транспортные операции, в свою очередь, определяются уровнем устойчивости. Поэтому для разработки рекомендаций по сокращению времени транспортных операций необходима оценка устойчивости с помощью специальных расчетов формул. Рассмотрены разные варианты расчета, выбран вариант составления дифференциальных уравнений раскачивания. Отмечено, что лучше всего рабочий процесс описывается грузовыми диаграммами, поэтому именно их необходимо строить на базе дифференциальных уравнений. Рассмотрен пример построения грузовых диаграмм для ковшевого фронтального погрузчика. Дано описание использования грузовых диаграмм для составления рекомендаций по сокращению времени транспортных перемещений.

Ключевые слова: система мониторинга, эффективность, устойчивость, время транспортного перемещения, технический аудит, критерий эффективности.

The study objective is to review the prerequisites for reducing the time of transport movements of the road-building machinery. On the basis of the information received, the corresponding recommendations used in the performance control system and technical audit can be elaborated. Shortcomings of the existing monitoring systems are marked. It is shown that their application to improve the technical-and-economic efficiency of the road vehicles does not allow achieving the controlled results. The technical-and-economic effect should be assessed by the unit cost criterion taking into account the cost for ownership. To calculate such a criterion, it is necessary to have the source information that can be obtained by monitoring. At a minimum criterion, there are work performance and operating quality time limits. The possibility of implementing restrictions on the time performance which largely depends on the machine transportation operations time is considered. Transport operations, in turn, are determined by the stability level, so to elaborate recommendations on reducing the transport operations time it is necessary to evaluate the stability by special calculating formulas. Various options for calculating are considered, the option of differential rocking equations is selected. It is noted that the working process is better described by the loading workflow diagrams, so they should be built on the basis of differential equations. An example of the loading diagram construction for a front loader is given. The application of loading diagrams to elaborate recommendations on reducing the transport operations time is shown.

Keywords: monitoring system, efficiency, sustainability, moving time, technical audit, efficiency criterion.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: effectmash@mail.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Анализ существующих систем мониторинга эффективности дорожных машин выявил факт регистрации технических показателей без учета экономических данных [1]. Нет сведений о наличии аналитического центра, в котором могли бы производиться расчеты по специализированным методикам. Таким образом, существующие мониторинговые системы не обладают функционалом количественной оценки технико-экономической эффективности, что препятствует оценке вводимых мероприятий. В частности, невозможно оценить чувствительность систем машин по показателям экономии денежных средств к вводимым управляющим воздействиям.

Для заданных условий эксплуатации наилучшей будет машина, при помощи которой можно выполнить задачу с наименьшими затратами (показатель 1) за приемлемые сроки (показатель 2) при приемлемом качестве (показатель 3). Каждый из трех перечисленных показателей можно использовать в качестве критерия. Однако недостаточность исходной информации создает известные проблемы при использовании этого критерия. Поэтому величину затрат целесообразно оценивать в соизмерении с работой при помощи удельной величины — себестоимости единицы продукции с учетом затрат на владение (СЕПВ). Такой подход позволяет использовать результаты оценки при выполнении технического аудита в качестве инструмента для выявления направлений развития эксплуатационного предприятия или производства (см., например, [2–5]).

Все три показателя не могут одновременно достичь экстремума, поэтому часть из них целесообразно ограничить. Из перечисленных трех показателей только один (СЕПВ) позволяет оценивать прибыль — наиболее значимый фактор при определении эффективности. Соответственно, в качестве целевой функции целесообразно выбрать минимизацию СЕПВ.

Итак, при мониторинге технико-экономической эффективности дорожных машин будут учитываться в качестве основных:

- целевая функция — минимум СЕПВ,
- ограничение — показатель (параметр) времени выполнения работы,
- ограничение — показатель (параметр) качества работы.

Исследовательская часть. Рассмотрим, как можно реализовать ограничение по времени выполнения работы, оказывающее прямое влияние на производительность машины. При этом время выполнения работы во многом зависит от времени транспортных операций машин. Рекомендации о коррекции времени транспортных перемещений формируются с учетом оценки устойчивости машин, для чего используются расчетные зависимости, составляемые на базе расчетных схем.

Перемещение дорожных машин при выполнении рабочих операций приводит к изменению нагрузок на опорные конструкции, что обусловлено перераспределением статических сил и возникновением динамических нагрузок.

Нулевое значение нагрузки на опорной конструкции способствует раскачиванию машины вокруг оси, называемой ребром опрокидывания. При раскачивании возникает опасность «перехода» равнодействующей сил тяжести за ребро опрокидывания. В данном случае опрокидывание неизбежно, даже если действие динамических сил прекращается. Для предупреждения подобных ситуаций необходимы расчеты на устойчивость.

Существуют различные методы определения коэффициента устойчивости. Как правило, при расчетах принимаются во внимание нагрузки от сил тяжести и динамические силы (с помощью коэффициента запаса). Таким образом, можно оценить устойчивость машины на базе диагностических показателей — коэффициентов устойчивости, не предусматривающих возможность учета закона раскачивания.

В последние десятилетия появились компьютерные приложения, позволяющие оценить динамическую устойчивость. Для этого составляется графическая модель и описывающие ее поведение алгебраические и дифференциальные уравнения [6, 7]. Однако они не могут быть интегрированы в аналитический центр мониторинговой системы управления эффективностью без специальных изменений.

В научных работах по исследованию динамики машин и механизмов [8–10] не рассматриваются задачи оценки устойчивости. В работах [11–13] рассмотрены вопросы оценки и повышения устойчивости машин, но их методики направлены на конкретный вид машины, что сужает область использования.

Таким образом, можно обоснованно утверждать, что существует потребность в создании математических моделей, пригодных для введения в программное обеспечение аналитического центра управления эффективностью техники.

Сложность и детализация расчета при моделировании динамики движений элементов рабочего оборудования машин в процессе потери устойчивости зависят от условий исследования [14]:

- с определением законов движений всех подвижных элементов (звеньев) рассматриваемой расчетной схемы;
- с определением закона движения только опорно-ходового устройства.

В первом случае необходимо составление и решение дифференциального уравнения. Очевидно, что с увеличением числа дифференциальных уравнений возрастает сложность математической модели. Таким образом, второе направление представляется значительно более простым в реализации. В данном случае необходимо задать законы

движения по степеням свободы схемы, для которых дифференциальное уравнение не составляется. Однако в общем случае закон движения не известен, задать его можно только укрупненно — соответственно, результаты такого анализа будут менее точными и дадут меньше информации.

Итак, при определении законов движений всех элементов необходимо составить систему дифференциальных уравнений и обеспечить ее решение. Для описания движений машины в одной плоскости нужно составить многосвязный механизм (рис. 1).

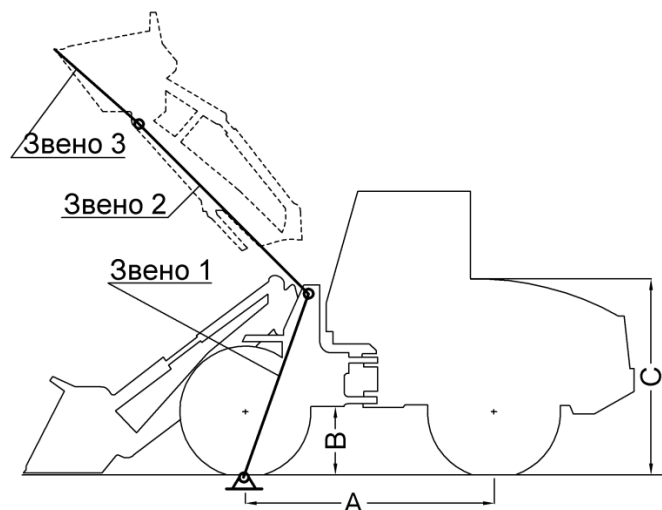


Рис. 1. Схема пневмокошесного фронтального погрузчика с ковшевым рабочим оборудованием

В общем случае схема может состоять из произвольного количества звеньев. Если начать нумерацию звеньев моделирующей схемы (многосвязника) с опорно-ходового устройства, то последнее будет носить номер звена 1 (рис. 1). Соответственно, звенья 2, 3, 4 и т. д. будут моделировать рабочее оборудование. Иными словами, если говорить о фронтальном погрузчике, то звеном 2 будет конструкция подъема ковша, звеном 3 — сам ковш. Звено 1 начинает поворот только при потере устойчивости — раскачивании. У некоторых машин звенья рабочего оборудования (например, рукоять экскаватора-погрузчика) имеют переменную длину.

Звенья можно принять недеформируемыми, поскольку деформируемость не оказывает влияния на устойчивость. Для использования существующих формул необходимо обозначить центры тяжести звеньев и координаты шарниров (рис. 2).

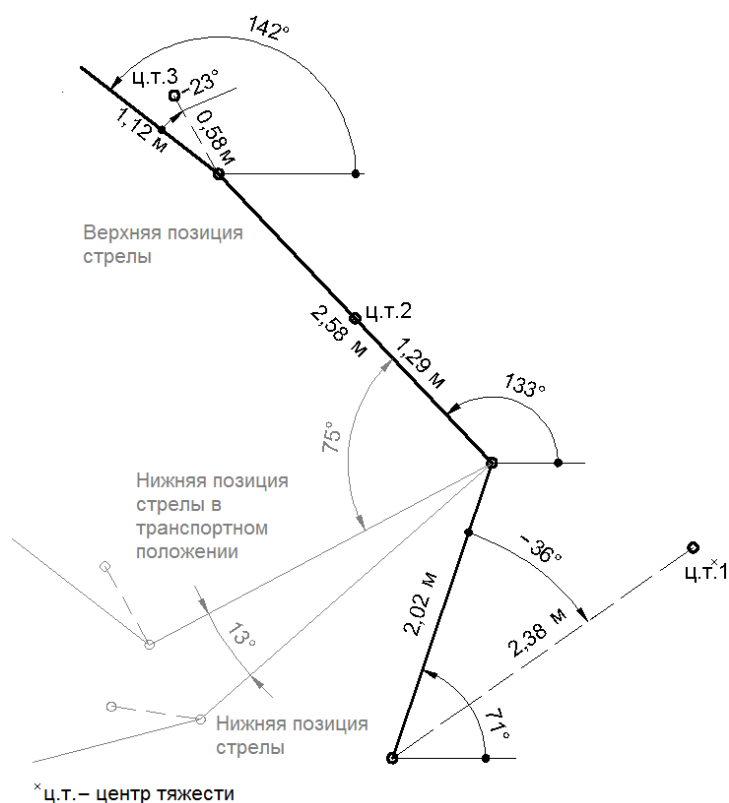


Рис. 2. Параметры моделирующего многосвязника

В общем случае при составлении динамической расчетной схемы можно предусмотреть возможность изменения длины звена и угловой позиции между последующим и предыдущим звеном. Изменение длины звена происходит с небольшими скоростями и не должно оказывать существенного влияния на устойчивость, поэтому данный фактор можно не вводить в схему. Целесообразно обеспечить возможность поступательного движения всей схемы целиком, моделирующего перемещение шасси. Для упрощения расчетной схемы закон движения можно задать, не составляя дифференциальное уравнение.

Наихудшей рабочей ситуацией является опрокидывание машины. Для расчетной схемы соответствующие условия можно назвать расчетными случаями. Например, для схемы экскаватора таким расчетным случаем будет единовременное торможение стрелы, рукояти и ковша при движении вниз.

Оператор выбирает момент торможения таким образом, чтобы остановка рабочего оборудования произошла по прохождении некоторого пути. Путь характеризуется углом поворота звена и преодолевается за время, которое удобно использовать в качестве характеристики торможения при составлении расчетной схемы. Иными словами, если в реальности оператор контролирует путь торможения, то в расчетной схеме для упрощения зависимостей момент торможения задается в виде конкретной численной величины.

Плечо действия силы от гидроцилиндра относительно оси шарнира в процессе изменения угловой позиции шарнира переменено, поэтому даже при постоянном усилии на гидроцилиндре момент будет меняться в зависимости от угловой позиции. Если пренебречь этим фактом, то момент торможения можно принять постоянным.

На основании изложенного процесс торможения будет характеризоваться постоянной величиной момента торможения, действующего на протяжении некоторого времени торможения. Причем момент торможения является исходной информацией, а время торможения — результатом расчета. При остановке звена его неподвижность обеспечивается соответствующим моментом. Момент торможения конкретных величин прикладывается во всех шарнирах, где присутствуют гидроцилиндры, поэтому в расчетной схеме в общем случае действуют несколько тормозных моментов на протяжении соответствующих отрезков времени.

Опрокидывание можно считать неизбежным, если раскачивание звена 1 (опорно-ходовое устройство) не меняет направления по окончании действия сил инерции. В расчетной схеме действие сил инерции оканчивается с завершением действия последнего из моментов торможения. Если после этого звено 1 меняет направление вращения, то линия действия равнодействующей сил тяжести еще не перешла оси раскачивания и произойдет возврат в исходную позицию. Для решения задачи следует получить зависимость угловых координат всех шарниров схемы от времени, для чего необходимо иметь данные о балансе сил.

На звено схемы действуют [14]:

- силы инерции: центробежные, касательные и Кориолисовы — от собственного поворота звена и от поворота предшествующих звеньев;
- силы тяжести;
- моменты торможения.

Центробежная сила присутствует всегда при наличии вращения и не меняет направления относительно его радиуса. Касательная сила инерции перпендикулярна радиусу вращения, присутствует только при ускоренном/замедленном вращении и может менять направление относительно радиуса. Сила Кориолиса присутствует при вращении в случае изменения длины радиуса вращения и может менять направление относительно радиуса. При сравнительно небольших угловых скоростях (именно такие характерны для рабочего оборудования дорожных машин) силы Кориолиса не достигают больших величин, поэтому их влияние в данном случае не учитывается.

Итак, описанная выше расчетная схема предполагает составление математических моделей и учет законов движения в шарнирах. Она реализуется в несколько этапов. Для каждого из звеньев определяются:

- численные значения моментов — отдельно для каждой действующей силы;
- направления действия моментов для каждой силы;
- действующие суммарные моменты;
- угловые ускорения, угловые скорости и угловые координаты.

В процессе реализации этих этапов получены математические модели произвольной плоской многозвенной схемы, позволяющей производить оценку устойчивости машин с рабочим оборудованием манипуляторного типа при наличии рабочих движений в одной плоскости [14–15].

В качестве примера реализации описанной расчетной схемы и математических моделей рассмотрим устойчивость фронтального ковшевого погрузчика массой 7770 кг с характеристиками: $A = 2,6$ м, $B = 0,62$ м, $C = 2,08$ м (рис. 1) [15]

В проспекте отсутствуют данные о позициях центров тяжести и массах отдельных элементов. Принятые в связи с этим допущения делают расчетную схему соответствующей оригиналу лишь с некоторой степенью точности.

— Центр тяжести базового шасси расположен на расстоянии $0,75A$ от оси переднего колеса по горизонтали и на расстоянии $(B + C) / 2$ по вертикали. Здесь A — колесная база, B — дорожный просвет, C — высота по капоту (рис. 1).

— Центр тяжести стрелы находится на половине расстояния от оси вращения стрелы до оси вращения ковша.

— Масса рабочего оборудования (стрела и ковш) составляет 15 % от общей массы машины.

На основании допущений масса машины без рабочего оборудования равна 85 % от общей массы. Масса рабочего оборудования (стрелы и захвата) равна 15 % от общей массы. В таком случае для погрузчика:

— масса машины без рабочего оборудования (звено 1, рис. 1, 2) составит $7770 \cdot 0,85 = 6604,5$ кг;

— масса рабочего оборудования (звено 2) составит $7770 \cdot 0,15 = 1165,5$ кг.

Ковш при вращении стрелы занимает горизонтальную позицию, т. е. может вращаться относительно стрелы, составляя тем самым отдельное звено. В данном случае имеет место 3-звенная схема (рис. 1), состоящая из шасси (звено 1), стрелы (звено 2) и ковша (звено 3). Характеристики данной схемы представлены на рис. 2.

С позиции благоприятности условий для опрокидывания можно выделить следующие расчетные случаи (табл. 1):

- 1) машина неподвижна, стрела с грузом опускается и затормаживается;
- 2) машина замедляется, стрела с грузом опускается и затормаживается;
- 3) машина разгоняется, стрела с грузом опускается и затормаживается.

Таблица 1

Характеристики расчетной схемы к построению грузовых диаграмм для трех расчетных случаев

№ строки	Учитываемые факторы	№ расчетного случая		
		1	2	3
	Длина звена (м)			
1	1		2,02	
2	2		2,58	
3	3		1,12	
	Начальная угловая координата звена (град)			
4	1		71	
5	2		133	
6	3		142	
	Радиус центра тяжести звена (м)			
7	1		2,38	
8	2		1,29	
9	3		0,58	
	Угловая координата центра тяжести звена (град)			
10	1		–36	
11	2		0	
12	3		–23	
	Масса звена (кг)			
13	1		6604,5	
14	2		1165,5	
15	3		Искомая величина	
	Начальный момент торможения на звене (Н·м)			
16	1	–	–	–
17	2		208121,5	
	Начальная угловая скорость звена (рад/сек)			
18	1		0	
19	2		0,2	
20	Угол уклона (град)		0	
21	Ускорение поступательного движения (м/сек ²)	0	2	–2
22	Продолжительность действия ускорения (сек)	0	0,5	0,5

Третий расчетный случай не так опасен, как второй, введен только для возможности подтверждения адекватности используемой расчетной схемы и математических моделей.

Момент торможения на стреле принят таким (строка 17 табл. 1), чтобы дать остановку за время, меньшее 1 секунды.

Одним из наилучших вариантов описания возможностей прямого функционального назначения для рассматриваемого типа машин является грузовая диаграмма (рис. 3). Рабочее оборудование не имеет возможности удлинения, поэтому грузовая диаграмма представлена одной кривой, каждой угловой позиции стрелы в зависимости от расчетного случая соответствует своя грузоподъемность.

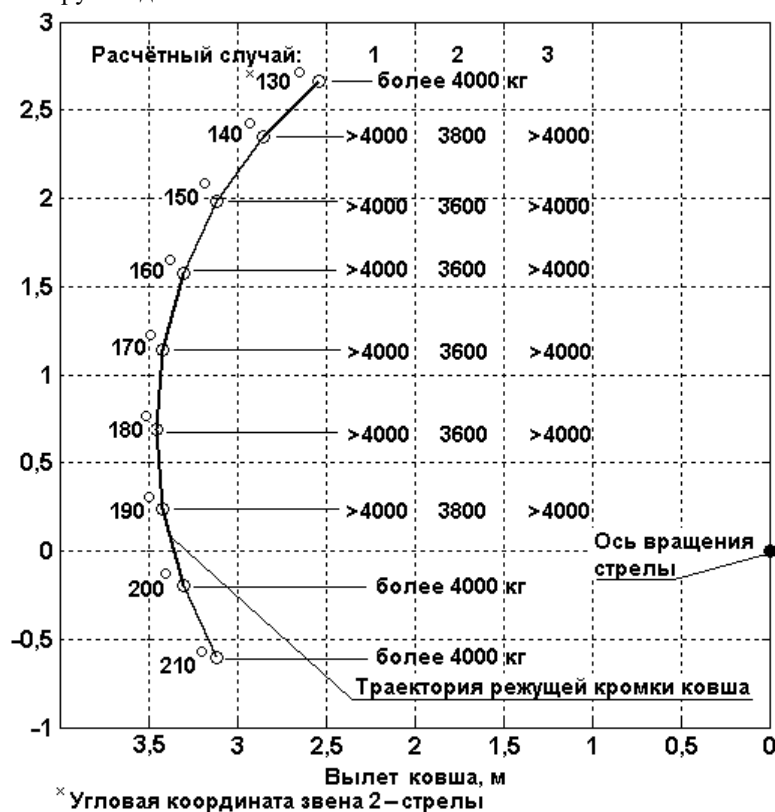


Рис. 3. Грузовая диаграмма ковшевого погрузчика для расчетных случаев 1–3

Максимальная грузоподъемность рассматриваемой машины принята равной 4000 кг. Как видно из диаграммы, максимальная грузоподъемность для рассматриваемых случаев определяется не устойчивостью, а, скорее, прочностными возможностями рабочего оборудования. Только для расчетного случая 2 (замедленное движение шасси) максимальная грузоподъемность меньше 4000 кг.

Процессы торможения протекают в короткие отрезки времени (менее 1 сек), что зависит от момента торможения на стреле (строка 17 табл. 1) и определено продолжительностью действия ускорения поступательного движения (строка 22 табл. 1). Именно для этих мгновений справедливы грузовые диаграммы на рис. 3. В остальное время грузоподъемность из условий устойчивости будет только выше.

Обсуждение и результаты. Результаты расчетов позволяют выявить предельные ускорения движения стрелы и шасси. Таким образом, можно определить предельные кинематические характеристики движения рабочих органов машины с учетом принципиальной возможности выполнения поставленной задачи из условий устойчивости и прочности рабочего оборудования. Далее необходимо на базе предельных кинематических характеристик движения назначить величины повышения аналогичных характеристик для остальных элементов рабочего цикла, занимающих большую часть времени работы машины. Такое повышение возможно в рамках систем автоматизированного управления, что определяет их актуальность, т. к. деятельность оператора не влияет на соответствующие показатели.

Информацию о возможности повышения кинематических характеристик следует передать по каналу обратной связи мониторинговой системы управления эффективностью.

Выводы.

1. В качестве критерия эффективности в мониторинговой системе можно использовать себестоимость единицы продукции с учетом затрат на владение с ограничениями по показателю (параметру) времени выполнения работ и показателю (параметру) качества работы.

2. Для машин с оборудованием манипуляторного типа время выполнения работы во многом зависит от кинематических характеристик транспортных операций, ограниченных устойчивостью против опрокидывания.
3. Для оценки устойчивости нужны математические модели, составляемые на базе расчетных схем с определением: законов движений всех подвижных элементов (звеньев) рассматриваемой расчетной схемы и закона движения только для опорно-ходового устройства.
4. Из результатов расчетов для режимов торможения при совершении транспортных операций выявляются предельные ускорения движения оборудования и шасси, на базе которых можно назначить величины повышения кинематических характеристик для остальных элементов транспортных операций.
5. Информацию о возможности повышения кинематических характеристик (в системе автоматизированного управления рабочим оборудованием машин) необходимо передать по каналу обратной связи мониторинговой системы управления эффективностью.

Библиографический список

1. Мандровский, К. П. Системы мониторинга дорожно-строительных, транспортных машин и дорожных покрытий / К. П. Мандровский // Интерстроймех-2015 : мат-лы междунар. науч.-техн. конф. — Казань, 2015. — С. 310–315.
2. Hiwase, P.-D. The Role of Technical Audit in Environmental Impact Assessment / P.-D. Hiwase, N.-S. Raman, H.-V. Hajare // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. — 2013. — Vol. 2 (3). — P. 664–669.
3. Srivastava S. B. Technical Audit — A Throughfare of System Perfection / S. B. Srivastava // International Journal of Scientific & Engineering Research. — 2012. — Vol. 3 (1). — P. 98–110.
4. Вокина, Е. Б. Основы промышленного и технического аудита / Е. Б. Вокина // Вестник транспорта Поволжья. — 2011. — № 5 (29). — С. 21–27.
5. Палкин, С. В. Технический аудит в системе менеджмента / С. В. Палкин // Железнодорожный транспорт. — 2009. — № 4. — С. 38–42.
6. EULER. Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем [Электронный ресурс] / ЗАО «Автомеханика». — Режим доступа: <http://www.euler.ru/> (дата обращения: 28.07.15).
7. Simulink. Графическая среда имитационного моделирования [Электронный ресурс] / Softline. — Режим доступа: <http://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения: 28.07.15).
8. Алексеева, Т. А. Математическое моделирование случайных дорожных возмущений при исследовании динамики мобильных машин / Т. А. Алексеева // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербург гос. политехн. ун-та. Физ.-мат. науки. — 2015. — № 2 (218). — С. 118–122.
9. Жулай, В. А. Динамика дефектных карданных передач строительных и дорожных машин / В. А. Жулай, В. А. Козлов, А. Н. Щиенко // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. — 2008. — № 1. — С. 72–78.
10. Ли, С. В. Динамика многороторных рабочих органов строительно-дорожных машин / С. В. Ли, Г. М. Ахметов, М. Н. Есенгалиев // Труды университета / Карагандинский гос. техн. ун-т. — 2007. — № 3. — С. 67–68.
11. Плиев, С. Х. Расчет двухосной колесной машины на устойчивость против опрокидывания / С. Х. Плиев // Изв. Горского гос. аграрн. ун-та. — 2015. — Т. 52, № 1. — С. 124–127.
12. Прохорова, Е. В. Методика оценки устойчивости экскаватора, оборудованного быстросоединительным устройством / Е. В. Прохорова // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений : междунар. науч.-практ. конф. / Белгородский гос. техн. ун-т им. В. Г. Шухова. — Белгород, 2013. — Т. II. — С. 180–185.
13. Плиев, С. Х. Расчет статической и динамической устойчивости трициклов / С. Х. Плиев, Т. Т. Агузаров // Изв. Горского гос. аграрн. ун-та. — 2014. — Т. 51, № 4. — С. 216–225.
14. Мандровский, К. П. Динамика и математическое моделирование движений машин при оценке устойчивости / К. П. Мандровский. — Москва : МАДИ, 2012. — 72 с.
15. Мандровский, К. П. Моделирование и оценка устойчивости самоходных машин / К. П. Мандровский. — Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 85 с.

References

1. Mandrovskiy, K.P. Sistemy monitoringa dorozhno-stroitel'nykh, transportnykh mashin i dorozhnykh pokrytiy. [Monitoring systems of road-building, transport vehicles and road surfaces.] Interstroymekh-2015: mat-ly mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Interstroymekh-2015: Proc. Int. Sci.-Eng. Conf.] Kazan, 2015, pp. 310–315 (in Russian).
2. Hiwase, P.-D., Raman, N.-S., Hajare, H.-V. The Role of Technical Audit in Environmental Impact Assessment. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2013, vol. 2 (3), pp. 664–669.

3. Srivastava S. B. Technical Audit — A Throughfare of System Perfection. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2012, vol. 3 (1), pp. 98–110.
4. Vokina, E.B. Osnovy promyshlennogo i tekhnicheskogo audita. [Basic principles of industrial and technical audit.] Vestnik transporta Povolzhya, 2011, no. 5 (29), pp. 21–27 (in Russian).
5. Palkin, S.V. Tekhnicheskii audit v sisteme menedzhmenta. [Technical audit in management system.] Railway Transport, 2009, no. 4, pp. 38–42 (in Russian).
6. EULER. Programmnyy kompleks avtomatizirovannogo dinamicheskogo analiza mnogokomponentnykh mekhanicheskikh sistem. [EULER. Software for automated dynamic analysis of multi-component mechanical systems.] Avtomekhanika CJSC. Available at: <http://www.euler.ru/> (accessed: 28.07.15) (in Russian).
7. Simulink. Graficheskaya sreda imitatsionnogo modelirovaniya. [Simulink. Graphical simulation environment.] Softline. Available at: <http://matlab.ru/products/simulink> (accessed: 28.07.15) (in Russian).
8. Alexeeva, T.A. Matematicheskoe modelirovanie sluchaynykh dorozhnykh vozmushcheniy pri issledovanii dinamiki mobil'nykh mashin. [Simulation of occasional road disturbances for mobile vehicles dynamic studies.] St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, 2015, no. 2 (218), pp. 118–122 (in Russian).
9. Zhulay, V.A., Kozlov, V.A., Shchienko, A.N. Dinamika defektnykh kardannykh peredach stroitel'nykh i dorozhnykh mashin. [The Dynamics of Defective Cardan Drives of Building and Road Machines.] News of higher educational institutions. Construction, 2008, no. 1, pp. 72–78 (in Russian).
10. Li, S.V., Akhmetov, G.M., Yesengaliev, M.N. Dinamika mnogorotornykh rabochikh organov stroitel'no-dorozhnykh mashin. [Dynamics of multiple-rotor working bodies of road construction machinery.] Karaganda State Technical University. University Proc., 2007, no. 3, pp. 67–68 (in Russian).
11. Pliev, S.Kh. Raschet dvukhosnoy kolesnoy mashiny na ustoychivost' protiv oprokidyvaniya. [Calculation for biaxial wheeled vehicle to rollover stability.] Journal of Proceedings of the Gorsky SAU, 2015, vol. 52, no. 1, pp. 124–127 (in Russian).
12. Prokhorova, E.V. Metodika otsenki ustoychivosti ekskavatora, oborudovannogo bystrosoedinitel'nym ustroystvom. [Valuation technique for stability of the excavator equipped with a quick coupling device.] Innovatsionnye materialy, tekhnologii i oborudovanie dlya stroitel'stva sovremennykh transportnykh sooruzheniy : mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Innovative materials, technologies and equipment for the construction of modern transport facilities: Int. Sc.-Pract. Conf.] Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2013, vol. II, pp. 180–185 (in Russian).
13. Pliev, S.Kh., Aguzarov, T.T. Raschet staticheskoy i dinamicheskoy ustoychivosti tritsiklov. [Calculation of static and dynamic stability of tricycles.] Journal of Proceedings of the Gorsky SAU, 2014, vol. 51, no. 4, pp. 216–225 (in Russian).
14. Mandrovskiy, K.P. Dinamika i matematicheskoe modelirovanie dvizheniy mashin pri otsenke ustoychivosti. [Dynamics and mathematical modeling of the machine movement when assessing sustainability.] Moscow: MADI, 2012, 72 p. (in Russian).
15. Mandrovskiy, K.P. Modelirovanie i otsenka ustoychivosti samokhodnykh mashin. [Simulation and stability rating of self-propelled vehicles.] Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 85 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 07.02.2015

Сдана в редакцию 09.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 628.517:625.1.08

DOI 10.12737/19683

Оценка коэффициента ослабления вибраций от колесных пар на основании кузова электровоза*

С. Ф. Подуст^{1**}¹ ООО Производственная компания "Новочеркасский электровозостроительный завод" (ПК НЭВЗ), г. Новочеркасск, Российская Федерация

Estimation of vibration attenuation coefficient of wheel sets on electric locomotive underframe***

S. F. Podust^{1**}¹ LLC PC "Novocherkassk Electric Locomotive Plant" (PC NEVZ), Novocherkassk, Russian Federation

Целью работы является описание теоретических и экспериментальных исследований коэффициента ослабления вибраций от колесных пар на основании кузова электровоза. Изучение виброакустических характеристик на рабочих местах локомотивных бригад показало, что превышения октавных уровней звукового давления над предельно допустимыми в значительной степени определяются структурной составляющей шума, которая формируется вибрациями элементов кузовных конструкций. Расчет скоростей колебаний элементов кузова основан на энергетических методах, традиционно применяемых для энергетически замкнутых систем. Система уравнений учитывает не только геометрические и физико-механические параметры элементов, но и вводимую в основание кузова вибрационную мощность от колесных пар при движении локомотивов. Для инженерных расчетов спектров вибрации элементов кузова и, соответственно, уровней звукового давления при оценке вводимой вибрационной мощности целесообразно использовать частотнозависимую величину коэффициента ослабления вибрации. Это особенно важно учитывать на этапе проектирования машины. Приведены результаты экспериментальных исследований указанной величины и вывод на этой основе регрессионных зависимостей для различных скоростей движения.

Ключевые слова: вибрация, колесная пара, элементы кузова, электровоз, коэффициент ослабления вибрации.

The work objective is to describe the theoretical and experimental research of the vibration attenuation coefficient of the wage wheels on the electric locomotive underframe. Studying the vibro-acoustic characteristics at the workplaces of the locomotive crews shows that the excess of the octave sound-pressure levels over the maximum permissible values is largely determined by the noise structural component which is generated by vibrations of the body parts. The vibration velocity calculation is based on the energy methods traditionally used for the energy-closed circuits. The system of equations takes into account not only the geometric parameters of the elements, their physical and mechanical properties, but also the vibration power from the locomotive wheel pairs introduced into the base body under the speed conditions. For the engineering analysis of the vibration spectra of the body parts, and, respectively, of the sound-pressure levels when evaluating the introduced vibration power, it is expedient to use a frequency dependent value of the vibration reduction factor. This is especially important at the machine designing stage. Therefore, the results of the experimental study of the given value and the development of the regressional dependences for various motion speeds on this basis are presented.

Keywords: vibration, wage wheels, body parts, electric locomotive, vibration reduction factor.

Введение. Изучению закономерностей формирования спектров вибрации и шума при движении подвижного состава посвящены работы [1–11]. Теоретические и экспериментальные исследования виброакустических характеристик на рабочих местах локомотивных бригад, приведенных в работах [10, 11], показали, что превышение предельно допустимых значений октавных уровней звукового давления в значительной степени определяется структурной составляющей шума.

Обработка результатов экспериментальных исследований. Для уточнения расчета виброскоростей и уровней структурного шума проводились экспериментальные исследования коэффициентов ослабления вибраций

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: PodustSS@nevz.com

***The research is done within the frame of the independent R&D.

(k_{oc}), передаваемых от колесных пар на пол кузова. Методика проведения экспериментов подробно описана в работе [10]. При этом рассматривался более широкий низкочастотный диапазон, поскольку нормирование вибрации на рабочем месте машинистов проводится в этой области частот. При проведении экспериментов выяснилось, что коэффициент ослабления вибрации зависит не только от их частоты, но и от скорости движения электровоза.

Исследования вибрации представляли собой серию экспериментов, в ходе которых значения коэффициента ослабления четырежды измерялись согласно стандартной матрице планирования двухуровневого двухфакторного ПФЭ (полный факторный эксперимент) 2^2 (табл. 1). В последнем столбце табл. 1 указан порядок (на основе генератора случайных чисел) выполнения отдельных опытов при их рандомизации по времени.

Таблица 1

План ПФЭ 2^2

№ п/п	Факторы		Порядок реализации опытов
	x_1	x_2	
1	–	–	4
2	+	–	2
3	–	+	1
4	+	+	3

Результаты измерений коэффициента ослабления вибрации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ п/п	V , км/ч	f , Гц	k_{oc1}	k_{oc2}	k_{oc3}	\bar{k}_{oc}	$(k_{oc1} - \bar{k}_{oc})^2$	$(k_{oc2} - \bar{k}_{oc})^2$	$(k_{oc3} - \bar{k}_{oc})^2$	$\sum_{u=1}^n (k_{oci,u} - \bar{k}_{oci})^2$
1	70	8	0,126	0,132	0,120	0,126	0,000E+00	3,974E-05	3,974E-05	7,949E-05
2	100	8	0,204	0,215	0,194	0,204	0,000E+00	1,044E-04	1,044E-04	2,088E-04
3	70	8000	0,180	0,189	0,171	0,180	7,704E-34	8,139E-05	8,139E-05	1,628E-04
4	100	8000	0,161	0,169	0,153	0,161	7,704E-34	6,470E-05	6,470E-05	1,294E-04

Для обработки результатов экспериментов необходимо определить математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение по формулам:

$$\bar{k}_{oci} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n k_{oci,u}; \quad (1)$$

$$\sigma_{ki}^2 = \sum_{u=1}^n (k_{oci,u} - \bar{k}_{oci})^2. \quad (2)$$

Проведем оценку статистической однородности результатов эксперимента по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{\sum_{u=1}^n (k_{oci,u} - \bar{k}_{oci})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^n (k_{oci,u} - \bar{k}_{oci})^2} \leq G_m. \quad (3)$$

Здесь i — номера серий опытов (от 1 до N); u — количество параллельных опытов в серии (от 1 до n); G_p и G_m — расчетный и табличный критерии Кохрена для 5-процентной значимости при N сравниваемых и n параллельных опытах:

$$G_p = \frac{0,00021}{0,00058} = 0,36 < G_m = 0,76.$$

Таким образом, считаем результаты статистически однородными, т.е. соответствующими нормальному распределению.

Определим дисперсию воспроизводимости в натуральных переменных по формуле:

$$S_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^n (k_{oci,u} - \bar{k}_{oci})^2}{N(n-1)} = \frac{0,00058}{4(3-1)} = 7,26 \cdot 10^{-5}. \quad (4)$$

Результаты измерения коэффициентов ослабления вибрации (их средние значения) представлены на рис. 1.

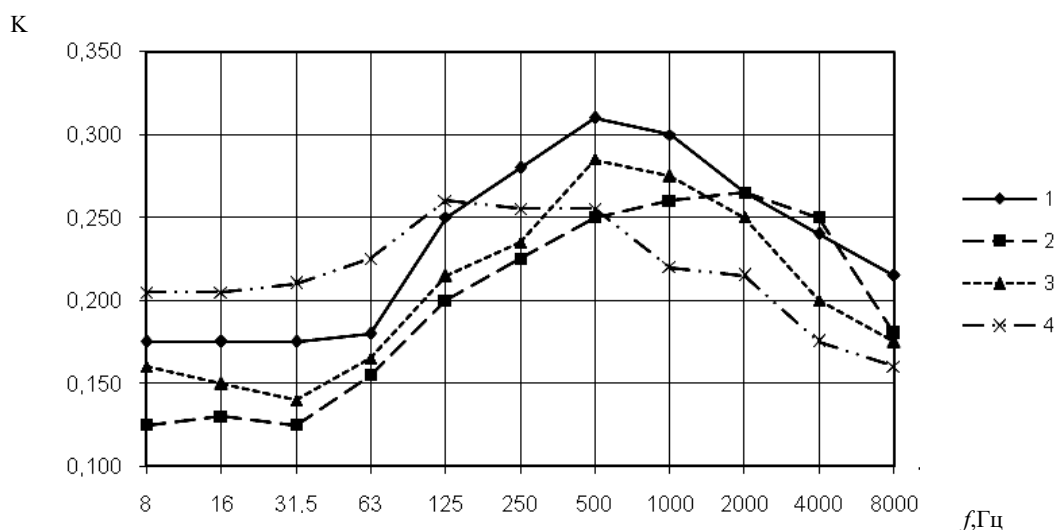


Рис. 1. Коэффициенты ослабления вибраций при скоростях движения: 1 — 80 км/ч; 2 — 70 км/ч; 3 — 90 км/ч; 4 — 100 км/ч

Определение регрессионных зависимостей. Анализ результатов экспериментов показывает, что максимальные значения коэффициента ослабления вибраций находятся в среднечастотной области и имеют четкую зависимость от скорости движения локомотива. При этом просматривается интересная особенность — с увеличением скорости движения локомотива экстремум кривых смещается в область более низких частот. Так, для скорости 70 км/ч экстремум находится на частоте 2000 Гц, а при скорости 100 км/ч — 125 Гц. Эта особенность осложняет поиск аналитической зависимости функции частотнозависимого коэффициента ослабления вибрации, поэтому принято приближение экстремума всех кривых к частоте 500 Гц, поскольку разница между экспериментальными и расчетными данными незначительна.

Изменение коэффициента ослабления вибрации в зависимости от скорости движения также позволяет выявить экстремальное значение, особенно в среднечастотной области, на скорости 80 км/ч. Таким образом, функция экстремальна по двум координатам, и ее можно аппроксимировать как функцию двух переменных, так как выполняется условие ортогональности, обеспечивающее получение независимых оценок коэффициентов регрессии и их дисперсий [12].

Экстремальность функции в обеих плоскостях требует применения квадратичной аппроксимации или нахождения степенной функции адекватного поведения. При этом необходимо учитывать, что один из факторов, а именно частота f , является величиной геометрического ряда, последующие значения которого увеличены в 2 раза по сравнению с предыдущим. Для смягчения влияния этого параметра его необходимо прологарифмировать.

Таким образом, учитывая экстремальность функции и необходимость логарифмирования входных факторов, принято решение аппроксимировать зависимость степенными функциями. Для этого можно использовать метод передела, который состоит в построении двух полнофакторных экспериментов таким образом, что значение факторов, обеспечивающих оптимум параметра выхода, является общей границей интервалов их варьирования, поставленных с двух сторон оптимума.

Границей интервалов являются значения факторов, находящихся в экстремуме функции. В данном случае определены следующие интервалы:

- для первой области — $f = 8\text{--}500$ Гц, $V = 70\text{--}80$ км/ч;
- для второй области — $f = 500\text{--}8000$ Гц, $V = 80\text{--}100$ км/ч.

Для крайних точек интервалов необходимо определить выход, т. е. значение коэффициентов ослабления вибрации. Они комбинируются следующим образом (табл. 3):

Таблица 3

Комбинация выходов при ПФЭ 2^2

x_1	x_2
min	min
max	min
min	max
max	max

В нашем случае такая комбинация имеет следующий вид (табл. 4):

Таблица 4

Комбинация выходов для обеих областей

V , км/ч	f , Гц	k_{oc}
70	8	0,126
80	8	0,176
70	500	0,25
80	500	0,311

V , км/ч	f , Гц	k_{oc}
80	500	0,311
100	500	0,257
80	8000	0,215
100	8000	0,161

Для получения степенной зависимости необходимо прологарифмировать все параметры модели. Учитывая порядок коэффициента ослабления вибрации, искусственно увеличим его на два порядка. Тогда исходные данные будут следующими (табл. 5).

Таблица 5

Исходные данные для расчета коэффициентов регрессии

$\ln V$	$\ln f$	$\ln(100 \cdot k_{oc})$
4,248495	2,079442	2,533697
4,382027	2,079442	2,867899
4,248495	6,214608	3,218876
4,382027	6,214608	3,437208

$\ln V$	$\ln f$	$\ln(100 \cdot k_{oc})$
4,382027	6,214608	3,437208
4,60517	6,214608	3,246491
4,382027	8,987197	3,068053
4,60517	8,987197	2,778819

При этом уравнение регрессии в кодовых переменных будет иметь вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (5)$$

где $y = \ln(100 \cdot k_{oc})$; $x_1 = \ln V$; $x_2 = \ln f$.

Для нахождения коэффициентов уравнения регрессии необходимо скомпоновать выходы так, как представлено в табл. 6.

Таблица 6

Компоновка выходов для расчета коэффициентов регрессии

y	$-y$	$-y$	y
y	y	$-y$	$-y$
y	$-y$	y	$-y$
y	y	y	y
Σ_0	Σ_1	Σ_2	Σ_{12}

$$\text{Тогда } b_0 = \frac{\Sigma_0}{4}; b_1 = \frac{\Sigma_1}{4}; b_2 = \frac{\Sigma_2}{4}; b_{12} = \frac{\Sigma_{12}}{4}.$$

Таким образом, на основе выше полученных данных, уравнения регрессии в кодовых переменных имеют вид:
 $y = 3,014 + 0,138x_1 + 0,314x_2 - 0,029x_1x_2$; $y = 3,133 - 0,12x_1 - 0,209x_2 - 0,025x_1x_2$.

Определим значимость коэффициентов уравнений регрессии сравнением их абсолютного значения с доверительным интервалом:

$$\Delta b = t_\alpha \cdot \sqrt{S_b^2} < |b_i|. \quad (6)$$

Здесь t_α — критерий Стьюдента для числа степеней свободы $\nu = N \cdot (n - 1)$ (в данном случае при $\nu = 8$ и $t_\alpha = 2,3$);

S_b^2 — дисперсия коэффициентов уравнений регрессии:

$$S_b^2 = \frac{S_k^2}{N \cdot n} = \frac{7,26 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 3} = 6,05 \cdot 10^{-6}.$$

$$\text{Тогда } \Delta b = 2,3 \cdot \sqrt{6,05 \cdot 10^{-6}} = 0,057.$$

Анализ полученных коэффициентов уравнений регрессии приведен в табл. 7.

Таблица 7

Значимость коэффициентов уравнения регрессии

	Δb		$ b_i $	Вывод
0	0,057	<	3,014	Значим
1		<	0,138	Значим
2		<	0,314	Значим
12		>	0,029	Незначим

	Δb		$ b_i $	Вывод
	0,057	<	3,133	Значим
		<	0,120	Значим
		<	0,209	Значим
		>	0,025	Незначим

Из табл. 7 видно, что коэффициенты при произведении x_1 и x_2 статистически незначимы, поэтому данными членами уравнений можно пренебречь. Тогда

$$y = 3,014 + 0,138x_1 + 0,314x_2; \quad y = 3,133 - 0,12x_1 - 0,209x_2.$$

Для перехода от кодовых переменных к натуральным необходимо выполнить следующие замены переменных:

$$x_1 = \frac{2(\ln V - \ln V_{\max})}{\ln V_{\max} - \ln V_{\min}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln f - \ln f_{\max})}{\ln f_{\max} - \ln f_{\min}} + 1.$$

Тогда для первого уравнения:

$$x_1 = \frac{2(\ln V - 4,382)}{4,382 - 4,2485} + 1 = 14,978 \ln V - 64,63,$$

$$x_2 = \frac{2(\ln f - 6,215)}{6,215 - 2,079} + 1 = 0,484 \ln f - 2,006.$$

Для второго уравнения

$$x_1 = \frac{2(\ln V - 4,605)}{4,605 - 4,382} + 1 = 8,963 \ln V - 40,275,$$

$$x_2 = \frac{2(\ln f - 8,987)}{8,987 - 6,215} + 1 = 0,721 \ln f - 5,483.$$

Подставляя замену и приводя подобные, получаем уравнения с натуральными переменными:

$$\ln(100 \cdot k_{oc}) = -6,543 + 2,069 \ln V + 0,152 \ln f; \quad \ln(100 \cdot k_{oc}) = 9,112 - 1,075 \ln V - 0,151 \ln f.$$

Проводим потенцирование и получаем степенные зависимости

$$k_{oc} = 1,4 \cdot 10^{-5} V^{2,069} f^{0,152}; \quad k_{oc} = 90,657 V^{-1,075} f^{-0,151}.$$

Для оценки погрешности полученных зависимостей сравним расчетные и экспериментальные значения коэффициентов ослабления вибрации (табл. 8).

Таблица 8

Погрешность расчетных и экспериментальных значений

V , км/ч	f , Гц	k_{oc}	$k_{oc.p}$	Δ , %
70	8	0,126	0,129	2,94
80	8	0,176	0,171	-2,86
70	500	0,25	0,243	-2,86
80	500	0,311	0,32	2,94

V , км/ч	f , Гц	k_{oc}	$k_{oc.p}$	Δ , %
80	500	0,311	0,319	2,49
100	500	0,257	0,251	-2,43
80	8000	0,215	0,210	-2,43
100	8000	0,161	0,165	2,49

Наибольшая погрешность полученных зависимостей не превышает 3 %.

Графическая интерпретация этой модели представляет собой две поверхности, соединенные в общей точке экстремума исследуемой функции. Для построения этих поверхностей необходимо определить значения промежуточных точек по полученным зависимостям. Точка экстремума не является центром симметрии функции, она смещена по обоим координатам. Поэтому для малых интервалов определим значение одной промежуточной точки, для больших — двух точек. Результаты расчетов сведены в табл. 9.

Таблица 9

Расчетные значения k_{oc} в промежуточных точках

V , км/ч	f , Гц	k_{oc}
70	8	0,1297
70	31,5	0,1597
70	125	0,1968
70	500	0,2429
75	8	0,1496
75	31,5	0,1842
75	125	0,227
75	500	0,2801
80	8	0,171
80	31,5	0,2105
80	125	0,2594
80	500	0,3201

V , км/ч	f , Гц	k_{oc}
80	500	0,3188
80	2000	0,2586
80	8000	0,2098
87	500	0,2913
87	2000	0,2363
87	8000	0,1917
93	500	0,2711
93	2000	0,2199
93	8000	0,1784
100	500	0,2507
100	2000	0,2034
100	8000	0,165

На рис. 2 представлена графическая реализация полученных зависимостей.

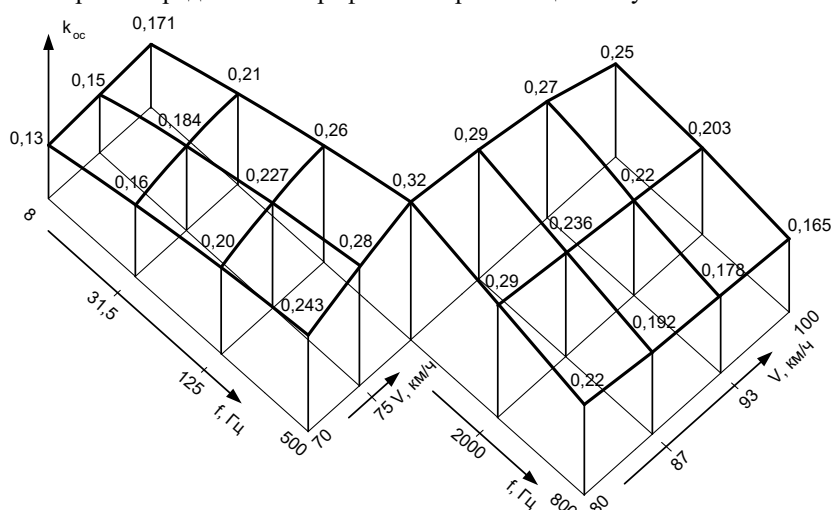


Рис. 2. Влияние скорости движения и частоты на величину коэффициента ослабления вибрации

Выводы. Использование полученных зависимостей коэффициентов ослабления вибрации позволяет упростить расчет и повысить его точность октавных уровней вибрации и звукового давления структурной составляющей шума на рабочих местах локомотивных бригад при различных скоростях движения. Во-вторых, повышается его точность.

Библиографический список

1. Dittrich, M. The IMAGINE source model for railway noise prediction / M. Dittrich // Acta Acustica united with Acustica. — 2007. — Vol. 93. — P. 185–200.
2. Подуст, С. Ф. Спектральный состав шума в кабинах локомотивов / С. Ф. Подуст, Ю. В. Пронников // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. ун-т путей сообщения. — Ростов-на-Дону, 2013. — Ч. 2. — С. 215–216.
3. Подуст, С. Ф. Анализ закономерностей шумообразования электропоездов / С. Ф. Подуст // Вестник РГУПС. — 2012. — № 4. — С. 42–45.
4. Подуст, С. Ф. Моделирование виброакустической динамики рельса на шпалах / С. Ф. Подуст, Д. А. Ку克林 // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 1/2 (70/71). — С. 106–111.
5. Подуст, С. Ф. Моделирование виброакустической динамики шпал при движении подвижного состава / С. Ф. Подуст // Вестник РГУПС. — 2013. — № 1. — С. 50–54.
6. Подуст, С. Ф. Экспериментальные исследования шума и вибрации грузовых поездов / С. Ф. Подуст // IX Промышленный конгресс юга России : сб. статей. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2013. — С. 212–214.

7. Подуст, С. Ф. Экспериментальные исследования диссипативной функции элементов остекления электровозов / С. Ф. Подуст, Ю. В. Пронников // IX Промышленный конгресс юга России : сб. статей. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2013. — С. 215–221.
8. Пронников, Ю. В. Моделирование структурной составляющей шума в кабинах машинистов подвижного состава / Ю. В. Пронников // Вестник РГУПС. — 2010. — № 3. — С. 64–68.
9. Колесников, И. В. Основы акустического проектирования кабин машинистов (теория и практика) / И. В. Колесников, Ю. В. Пронников, А. Н. Чукарин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2012. — 120 с.
10. Подуст, С. Ф. Основы виброакустических расчетов отечественных электровозов / С. Ф. Подуст, А. Н. Чукарин, И. В. Богуславский. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2013. — 160 с.
11. Способы снижения шума и вибраций при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. В. Колесников [и др.]. — Москва : ВИНТИ РАН, 2015. — 216 с.
12. Кохановский, В. А. Планирование экспериментальных исследований / В. А. Кохановский, М. Х. Сергеева. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2014. — 256 с.

References

1. Dittrich, M. The IMAGINE source model for railway noise prediction. Acta Acustica united with Acustica, 2007, vol. 93, pp. 185–200.
2. Podust, S.F., Pronnikov, Y.V. Spektral'nyy sostav shuma v kabinakh lokomotivov. [Spectral noise composition in the cabs of locomotives.] Tr. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Transport-2013». [Proc. Int. Sci.-Eng. Conf. “Transport-2013”.] Rostov Institute of Rail Transport Engineering, Rostov on Don, 2013, vol. 2, pp. 215-216 (in Russian).
3. Podust, S.F. Analiz zakonomernostey shumobrazovaniya elektropoyezdov [Analysis of the laws of electric trains noise.] Vestnik RGUPS, 2012, no. 4, pp. 42-45 (in Russian).
4. Podust, S.F., Kuklin, D.A. Modelirovaniye vibroakusticheskoy dinamiki rel'sa na shpalakh. [Vibroacoustic dynamics simulation of rail on sleepers.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 1-2 (70-71), pp. 106-111 (in Russian).
5. Podust, S.F. Modelirovaniye vibroakusticheskoy dinamiki shpal pri dvizhenii podvizhnogo sostava. [Modeling of vibroacoustic dynamics of sleepers during rolling stock movement.] Vestnik RGUPS, 2013, no. 1, pp. 50–54 (in Russian).
6. Podust, S.F. Eksperimental'nyye issledovaniya shuma i vibratsii gruzovykh poyezdov. [Experimental studies of noise and vibration freight trains.] IX Promyshlennyy kongress yuga Rossii: sb. statey. [Proc. IX Industrial Congress of South Russia.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013, pp. 212-214 (in Russian).
7. Podust, S.F., Pronnikov, Y.V. Eksperimental'nyye issledovaniya dissipativnoy funktsii elementov ostekleniya elektrovozov [Experimental studies of dissipation function of locomotive glazing elements.] IX Promyshlennyy kongress yuga Rossii: sb. statey (11–13 sentyabrya 2013, Rostov-na-Donu) [Proc. IX Industrial Congress of South Russia.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013, pp. 215-221 (in Russian).
8. Pronnikov, Y.V. Modelirovaniye strukturnoy sostavlyayushchey shuma v kabinakh mashinistov podvizhnogo sostava. [Modeling of the noise structural component in the driver's cab of rolling stock.] Vestnik RGUPS, 2010, no. 3, pp. 64-68 (in Russian).
9. Kolesnikov, I.V., Pronnikov, Y.V., Chukarin, A.N. Osnovy akusticheskogo proyektirovaniya kabin mashinistov (teoriya i praktika). [Basics of acoustic designing of driving cabs (theory and practice).] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2012, 120 p. (in Russian).
10. Podust, S.F., Chukarin, A.N., Boguslavskiy, I.V. Osnovy vibroakusticheskikh raschetov otechestvennykh elektrovozov. [Fundamentals of vibro-acoustic calculations of domestic locomotives.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013, 160 p. (in Russian).
11. Kolesnikov, I.V. et al. Spособы snizheniya shuma i vibratsiy pri proyektirovanii, proizvodstve i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. [Ways to reduce noise and vibrations in the design, manufacture and operation of rolling stock]. Moscow: VINITI RAN, 2015, 216 p. (in Russian).
12. Kokhanovskiy, V.A., Sergeeva, M.Kh. Planirovaniye eksperimental'nykh issledovaniy. [Planning of experimental research.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2014, 256 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 19.02.2016

Сдана в редакцию 19.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



629.7.017.1

DOI 10.12737/19693

Оценка надежности машин на основе рисков их функционирования*

И. А. Хозяев¹, Л. В. Коледов², В. А. Важенин^{3**}

^{1,2} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

³ Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Reliability evaluation of machines based on their operation risks***

I. A. Khozyaev, L. V. Koledov, V. A. Vazhenin**

^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

³ Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы являлось создание метода оценки и прогнозирования надежности сложных систем на основе статистического имитационного моделирования их работы. Использован метод рисков с учетом потерь от отказов при функционировании системы в зависимости от степени ее безотказности. Разработана программа для проведения имитационного моделирования с учетом рисков от надежности — "Reliability". Проверка разработанного метода проводилась на основе имитационного моделирования работы измельчителя компонентов комбикормов типа У17-УКИ. Полученные результаты отражают реальные процессы, происходящие при эксплуатации технических объектов. Метод полностью формализован и может быть использован для оценки надежности любых технических систем.

The work objective is to develop a technique of evaluation and forecasting of the complex systems reliability based on the statistic simulation of their operation. A method of risks inherent in the lost benefit is used. Dependences for determining failure losses under the system operation according to the degree of its reliability are offered. A simulation program taking into account risks of reliability — "Reliability" — is worked out. The developed method verification is based on the performance simulation of the feed ingredient cutter, such as U17-UKI. The results obtained reflect real processes occurring in the course of the technical objects operation. The method is fully formalized and can be used for estimating the reliability of any engineering system.

Ключевые слова: надежность, риск, статистическое имитационное моделирование.

Keywords: reliability, risk, statistic simulation modeling.

Введение. Отказ технической системы неизбежно ведет к потерям: производство останавливается или сокращается, отказавшая система требует ремонта, а последствия аварий — ликвидации. Кроме того, эксплуатация ненадежной техники может оказывать негативное влияние на окружающую среду и людей.

Экономическая оценка от ненадежности оборудования в настоящее время проводится в два этапа. Сначала рассчитываются показатели надежности системы или машины, а затем определяются убытки. Такая процедура довольно длительная и трудоемкая. Если использовать такое понятие как риск, то экономическую оценку ненадежности можно проводить быстрее и точнее. Риск является неизбежным атрибутом эксплуатации техники. Он является одним из важнейших показателей безопасности. Риск, возникающий в результате отказов техники, называется техногенным.

Риск можно рассматривать как вероятность некоторых неблагоприятных событий, но обычно под риском понимают оценку ожидаемого вреда (потерь) от неблагоприятных событий. В большинстве случаев риск оценивается денежными единицами, хотя могут быть и иные случаи.

Степень риска может быть оценена следующим образом [1–3]

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: dmitriydoi@gmail.com, leonidvkoledov@mail.ru, vladislav251990@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

$$R = Q(t) \cdot C = [1 - P(t)] \cdot C$$

$$R(t) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot p_j(t) \quad (1)$$

где R — величина риска, $P(t)$ — вероятность безотказной работы системы, $Q(t)$ — вероятность появления отказа, C — величина потерь, возникающих в результате отказа, c_j — потери от отказа j -ого элемента, $p_j(t)$ — вероятность безотказной работы j -ого элемента.

Постановка задачи. Вопрос заключается в определении $Q(t)$ или $P(t)$. Чаще всего определяется $P(t)$. Для этого строится структурная иерархическая схема системы (машины), состоящая из конечного количества элементов и на основе $P_j(t)$ (вероятность безотказной работы одного элемента) определяется $P(t)$.

Основные формулы для различных соединений. Элементы в системе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешано. Но, в конечном итоге, это будет сложное последовательное соединение. При таком соединении вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы всех элементов [4, 5].

$$p_c(t) = \prod_{j=1}^n p_j(t) \quad (2)$$

где $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы.

При параллельном соединении m элементов вероятность безотказной работы:

$$p_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^n 1 - p_j(t) \quad (3)$$

Поэтому параллельное соединение используется для эффективного резервирования системы. Для смешанного соединения (n последовательных групп из m параллельных элементов) вероятность безотказной работы:

$$p_c(t) = \prod_{j=1}^n \{1 - \prod_{j=1}^m 1 - p_j(t)\} \quad (4)$$

Каждый элемент характеризуется тремя показателями: наработкой на отказ T_p , временем восстановления T_e и ценой. T_p и T_e случайные величины, которые характеризуются соответствующими распределениями.

Программная реализация процесса. Решение задачи в такой постановке лучше всего проводить методом статистического моделирования [4,5].

Для оценки надежности системы и учета рисков была разработана программа для имитационного моделирования ее работы. Блок-схема программы приведена на рисунке 1 [6].

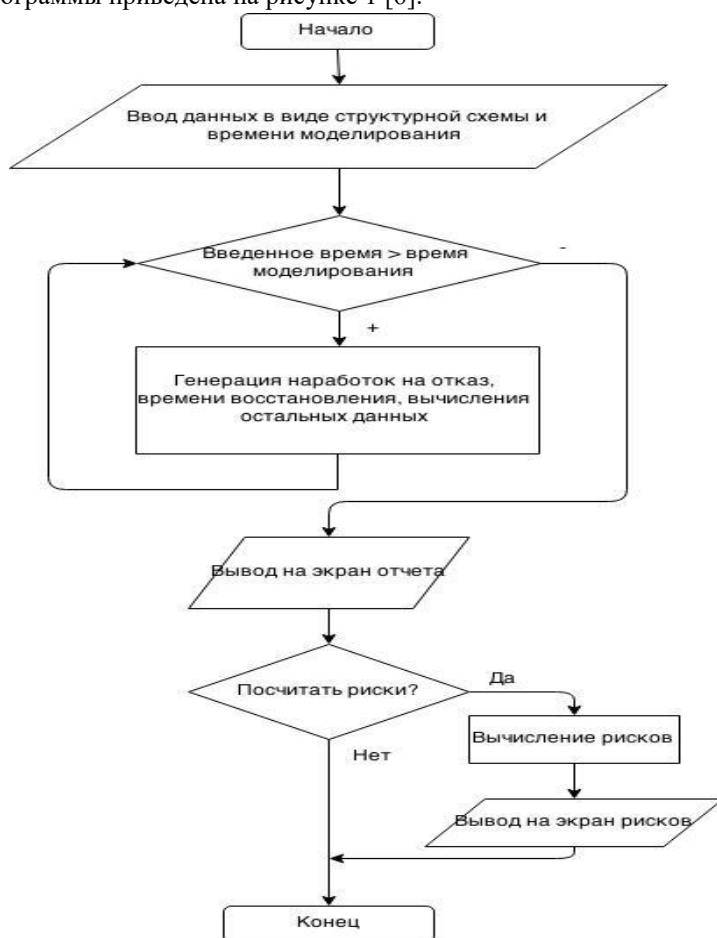


Рис. 1. Блок-схема программного комплекса Reliability

Достоинством представленного программного комплекса является его полная формализация, позволяющая имитировать надежность функционирования любых технологических систем при имеющейся структурной схеме и параметрах элементов, входящих в эту схему.

Проверка предполагаемого подхода по оценке риска, связанного с надежностью исследуемого объекта, проводили на основе имитационного моделирования надежности функционирования универсального измельчителя компонентов комбикормов типа У17-УКИ.

Общий вид измельчителя показан на рис. 2, а его структурная схема имитационного моделирования надежности представлена на рис. 3.



Рис. 2 Общий вид измельчителя У17-УКИ

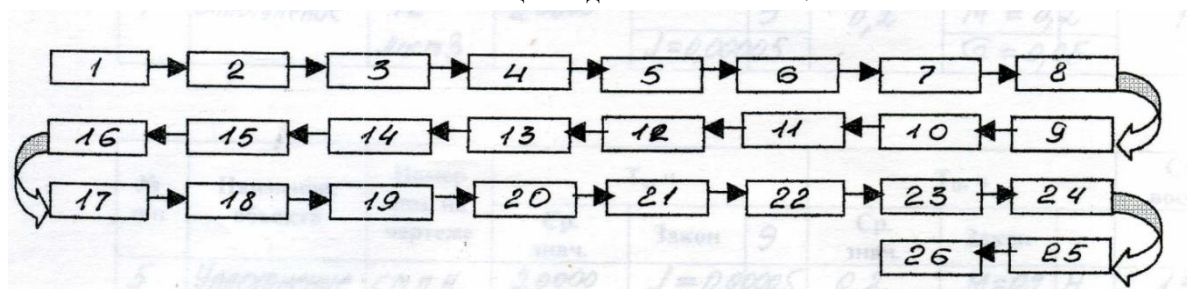


Рис. 3 Структурная схема измельчителя У17-УКИ : 1 — бункер для зерна с заслонкой; 2,3 — подшипник в сборе; 4,5 — уплотнение подшипника; 6 — шкив измельчающего барабана в сборе (со шпонкой и стопорным винтом); 7 — вал ротора; 8 — барабан ротора со шпонкой; 9-12 — пальцы молотков; 13 — набор молотков (24 шт.); 14 — роторная втулка барабана с винтом; 15 — нож; 16 — терка; 17 — ремень приводной; 18 — электродвигатель трехфазный; 19, 20 — конденсатор электролитический; 21 — кнопочная станция; 22 — пускатель; 23 — кабель питания; 24 — шкив электродвигателя в сборе; 25 — загрузочное устройство для овощей и зелени; 26 — корпус в сборе

В таблице 1 представлены фрагменты параметров законов распределения наработок на отказ T_O времени восстановления T_B и первоначальной стоимости элементов [7].

Таблица 1

Пример задания исходных данных для имитационного моделирования

п/п	Наименование объекта	T_O , ч		T_B , ч		Стоимость, руб
		Ср. знач.	Закон	Ср. знач.	Закон	
5	Нож	600	Н	0,12	Н	1000
			$M=600$ $\sigma=150$		$M=0.12$ $\sigma=0.03$	
6	Терка	600	Н	0,12	Н	1000
			$M=600$ $\sigma=150$		$M=0.12$ $\sigma=0.03$	

Имитационное моделирование проводилось на отрезке времени 10 000 часов при десятикратном повторении.

Вероятность появления отказов вычислялась на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования работы рассматриваемой системы по формуле статистической вероятности появления отказов [8–10]:

$$R_i(t) = \frac{m_i(t)}{n(t)} \quad (5)$$

где $m_i(t)$ — число отказов i -ого элемента к моменту времени t , $n(t)$ — общее число отказов всех элементов за промежуток t . Результаты моделирования представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Результаты оценки рисков от ненадежности измельчителя У17-УКИ.
Данные ранжированы по степени риска

№ п/п	Название	Цена детали, руб	Риск, руб
13	Комплект молотков	960	227,37
15	Нож	1000	223,68
16	Терка	1000	223,68
18	Электродвигатель	5000	131,58
24	Шкив ЭД	800	31,58
17	Ремень	350	18,42
7	Вал ротора	1200	15,79
1	Загрузочное устройство	600	15,79
22	Пускатель	480	12,63
19	Конденсатор 1	480	6,31
20	Конденсатор 2	480	6,31
21	Кнопочная станция	400	5,26
10	Палец молотка 3	200	5,26
23	Кабель электрический	300	3,95
12	Палец молотка 2	200	2,63
4	Уплотнение 2	60	0,79
14	Втулка распорная барабана	24	0,63

Остальные элементы из схемы на рис. 3 в таблицу не вошли ввиду малого влияния на надежность измельчителя.

При моделировании также рассчитывались показатели: коэффициент готовности (K_r), общее время восстановления всех отказов (T_v), суммарная стоимость рисков и количество отказов. Усредненные показатели надежности функционирования измельчителя У17-УКИ приведены в таблице 3, а скриншот окна программы показан на рис. 4.

Таблица 3

Сводные результаты статистического моделирования надежности функционирования измельчителя У17-УКИ на отрезке времени 10 000

Средний коэффициент готовности	Общее время восстановления, час	Общая стоимость рисков, руб	Начальные затраты (цена машины)	Количество отказов
0,99	13,94	69 808	22 394	69

№	Наименование элемента	Цена отказа	Наработка на отказ системы	Отказавший элемент	Коэффициент готовности	Средний Коэффициент готовности	Общее время восстановления	Общая стоимость	Начальные затраты
1	455559734	1000	566,11260816492	Терка	0,999763441563091	0,99464429582515	11,5852757213953	64414	23034
2		1000	92,881375691235	Нож	0,998836398597102				
3		24	121,562382945158	Втулка распорная б...	0,998908004399798				
4	123277577	1000	265,573282351458	Нож	0,999563185970554				
5		1000	79,3350251050768	Терка	0,998295954062313				
6		1000	347,799520104757	Терка	0,99978388255152				
7		1000	191,702937712906	Нож	0,999672334230345				
8		1600	14,1049982042711	Комплект молотков	0,982938436098776				
9		400	185,77189304908	Кнопочная станция	0,999082850644581				
1		480	13,1739754154901	Конденсатор 2	0,983016218992027				
1	1000222475	1000	142,41667073125	Терка	0,999258084370303				
1		1000	358,588833853232	Нож	0,999626243384744				
1		1000	69,2749150117348	Терка	0,997387713741645				
1		350	20,943955490875	Ремень	0,993346198937352				
1		1600	249,680060865233	Комплект молотков	0,999291440433789				
1		1000	137,007969545227	Нож	0,999191859751232				
1		1000	22,9685960597711	Терка	0,983339490530719				
1	1284179072	800	226,062594889352	Шкив ЭД	0,998826294050856				
1		480	217,82662706023	Конденсатор 1	0,999247674076243				
2		1000	183,761954959067	Терка	0,99951701537872				
2		1000	16,1894311140566	Нож	0,991415660094891				
2		1600	189,340812872656	Комплект молотков	0,999129060524754				
2	1338700075	1000	288,06217625662	Нож	0,999550539206212				
2		1000	303,548688676104	Терка	0,999624032117565				
2		800	43,2339085965866	Барaban ротора	0,995691488626397				
2		4000	25,3059216370475	Корпус в сборе	0,982756952091007				

Рис. 4. Скриншот работы программы

Проанализируем полученные результаты. Учитывая, что срок гарантийной работы измельчителя составляет 10 000 часов, то при работе в течение 7 часов в смену 305 дней в году срок службы машины составит 4,68 года. Исходя из этих рассуждений и, судя по показателям в табл. 3, машина довольно надежная. Общая стоимость рисков 69 808 руб. при стоимости машины 22 394 руб., что вполне согласуется с общепринятыми положениями, что эксплуатационные затраты обычно в 3–4 раза больше первоначальных.

Риски рассчитывались, исходя из предположения, что они определяются только стоимостью заменяемой детали. На самом деле в риски должны включаться стоимость поиска детали и оплата труда рабочего. В среднем это составляет 30% от стоимости детали. Стало быть, общая сумма рисков будет 90 750 руб. Посчитаем также упущенную выгоду по зерну. Производительность измельчителя по зерну составляет 200 кг/час. За 13,94 часа (общее время восстановления) должно быть измельчено $0,2 \times 13,94 = 2,78$ т. Стоимость одной тонны зерна в настоящее время составляет порядка 7 тысяч рублей. Тогда суммарная упущенная выгода составит 110 210 руб.

Как показывает опыт эксплуатации таких измельчителей, одним из слабых их мест являются молотки. Из каталога был выбран комплект молотков с наиболее высокой наработкой на отказ. Стоимость его составляла 1 600 руб. (против 960 руб. у прототипа). Далее была проведена оценка рисков по той же программе и методике. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Сводные результаты моделирования надежности функционирования измельчителя У17-УКИ с молотками повышенной надежности

Средний коэффициент готовности	Общее время восстановления, час	Общая стоимость рисков, руб.	Начальные затраты (цена машины)	Количество отказов
0,995	11,58	64 414	23 034	54

Тогда общая стоимость рисков улучшенной машины с учетом упущенной выгоды 83 746,2 руб., что на 26 463 руб. меньше, чем было. Таким образом, видим, что увеличение первоначальной стоимости машины на 640 руб. дает повышение эффективности на 26 463 руб., т.е. примерно в 30 раз больше, чем вложено.

Выводы:

- 1) Разработана система оценки рисков от ненадежности машин в виде упущенной выгоды.
- 2) Метод основывается на принципах статистического моделирования, является полностью формализованным и может применяться для любых систем и машин.
- 3) Проверка метода на основе имитационного моделирования надежности функционирования измельчителя компонентов комбикормов типа У17-УКИ показала хорошую сходимость реальных результатов с данными моделирования.

Библиографический список

1. Хенли, Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. — Москва : Машиностроение, 1984. — 352 с.
2. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. — Москва : Издательский дом «Академия», 2008. — 368 с.
3. Назаров, Н. Г. Методы экспериментальной оценки качества партии изделий с учетом степени риска : учебное пособие / Н. Г. Назаров. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 96 с.
4. Труханов, В. М. Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла : монография / В. М. Труханов, А. М. Матвеев. — Москва : Издательский дом «Спектр», 2012. — 663 с.
5. Труханов, В. М. Новый подход к обеспечению надежности сложных систем: монография / В. М. Труханов. — Москва : Издательский дом «Спектр», 2010. — 246 с.
6. Хозяев, И. А. Исследование надежности технологического оборудования методами статистического моделирования / И. А. Хозяев // Международная научно-практическая конференция в рамках промышленного прогресса Юга России «Инновационные технологии в Машиностроении». — 2009. — С.115–121.
7. Строгалева, В. П. Имитационное моделирование(2-е издание) : учебное пособие / В. П. Строгалева, И. О. Толкачева. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — 296 с.
8. Wang, Y. Reliability analysis of safety-instrumented systems operated in high-demand mode / Y. Wang, M. Rausand // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2014. — Vol. 32, № 11. — P.254–264.
9. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 560 с.
10. Rausand, M. Reliability effects of test strategies on safety-instrumented systems in different demand modes / M. Rausand, Y. Liu // Reliability Engineering and System Safety. — 2013. — Vol. 119, № 9. — P. 235–243.

References

1. Henley, E.J., Kumamoto, H. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i otsenka riska. [System reliability and risk analysis.] Moscow: Mashinostroenie, 1984, 352 p. (in Russian).
2. Vishnyakov, Y.D., Radaev, N.N. Obshchaya teoriya riskov. [General risk theory.] Moscow: Izdatel'skiy dom «Akademiya », 2008, 368 p. (in Russian).
3. Nazarov, N.G. Metody eksperimental'noy otsenki kachestva partii izdeliy s uchetom stepeni riska. [Methods for experimental quality assessment of a set of products with a risk score.] Moscow: Bauman MSTU, 2015, 96 p. (in Russian).
4. Trukhanov, V.M., Matveenko, A.M. Nadezhnost' slozhnykh sistem na vseh etapakh zhiznennogo tsikla: monografiya. [Reliability of complex systems at all stages of the life cycle: monograph.] Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr», 2012, 663 p. (in Russian).
5. Trukhanov, V.M. Novyy podkhod k obespecheniyu nadezhnosti slozhnykh sistem: monografiya. [A new approach to complex systems reliability control: monograph]. Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr», 2010, 246 p. (in Russian).
6. Khozyaev, I.A. Issledovanie nadezhnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya metodami statisticheskogo modelirovaniya. [Study on technological equipment reliability by statistical modeling methods.] Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya v ramkakh promyshlennogo progressa Yuga Rossii «Innovatsionnye tekhnologii v Mashinostroenii». [Int.Sci.-Pract. Conf. within the frame of the industrial progress of the South Russia "Innovative Technologies in Mechanical Engineering".] 2009, pp. 115–121 (in Russian).
7. Strogalev, V.P., Tolkacheva, I.O. Imitatsionnoe modelirovanie (2-e izdanie). [Simulation modeling.] 2nd ed. Moscow: Bauman MSTU, 2015, 296 p. (in Russian).
8. Wang, Y., Rausand, M. Reliability analysis of safety-instrumented systems operated in high-demand mode. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, vol. 32, no. 11, pp. 254–264.
9. Pronikov, A.S. Parametricheskaya nadezhnost' mashin. [Parametric reliability of machines.] Moscow: Bauman MSTU, 2002, 560 p. (in Russian).
10. Rausand, M., Liu, Y. Reliability effects of test strategies on safety-instrumented systems in different demand modes. Reliability Engineering and System Safety, 2013, vol. 119, no. 9, pp. 235–243.

Поступила в редакцию 15.12.2015

Сдана в редакцию 17.12.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.22

DOI 10.12737/19701

Экспериментальное исследование влияния массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования индуктора*

Н. В. Лимаренко¹, В. П. Жаров², Ю. В. Панов³, Б. Г. Шаповал^{4**}^{1,2,3,4} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Experimental study of the working media mass effect on the parameters featuring inductor performance quality***

N. V. Limarenko¹, V. P. Zharov², Y. V. Panov³, B. G. Shapoval^{4**}^{1,2,3,4} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассматривается перспективный способ обеззараживания жидких и пастообразных материалов в сельском хозяйстве. Суть способа заключается в комплексном физико-химическом воздействии вращающегося переменного электромагнитного поля. Реализация предложенного способа осуществляется в электромеханическом активаторе, представляющем собой индуктор. Целью данного исследования является получение математических моделей, количественно оценивающих влияние массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования индуктора. В качестве параметров, характеризующих качество функционирования индуктора, были выбраны сила электрического тока, активная электрическая мощность, реактивная электрическая мощность, полная электрическая мощность в цепи индуктора и магнитная индукция. Использовались методы инструментального измерения, статистической обработки, аналого-цифрового преобразования данных. Результаты исследования представлены математическими зависимостями, которые могут быть использованы при проектировании конструктивно новых индукторов.

Ключевые слова: сельское хозяйство, обеззараживание, электромагнитное поле, индуктор, масса рабочих тел, активная/ реактивная/ полная электрическая мощность, магнитная индукция.

A perspective method of disinfecting liquids and spreads in agriculture is considered. The principle of the method is about an integral physical and chemical impact of the rotating alternating electromagnetic field. The implementation of the proposed method is carried out in the electromechanical activator which is an inductor. The purpose of the research is to obtain mathematic models that are able to assess quantitatively the effect of the inductor mass on the parameters featuring the inductor performance quality. Current intensity, reactive power, total electric power in the inductor circuit, and magnetic induction, are chosen as such parameters. Methods of the instrumental measurement, statistic treatment and analogue-to-digital data conversion are used. The research results are presented by the mathematic dependences which can be used for designing new inductors.

Keywords: agriculture, disinfection, electromagnetic field, inductor, mass of working media, current intensity, active/ reactive / total electrical power, magnetic induction.

Введение. Большое количество сельскохозяйственных процессов включает операцию обеззараживания, целью которой может являться подготовка продукта для использования в технологическом процессе или уничтожение патогенной микрофлоры по его окончании. Примерами могут служить процессы подготовки воды для рыбоводческих хозяйств и обеззараживание отходов животноводства.

Наиболее перспективным способом обеззараживания жидких и пастообразных технологических материалов в сельском хозяйстве является воздействие на них вращающимся электромагнитным полем переменной частоты [1]. Об успешном использовании в других отраслях промышленности свидетельствуют работы А. А. Адошева, Ю. А. Бахвалова, Г. И. Володина, Е. А. Климова, Н. А. Деревянкина и др. Установки активации процессов, аппараты вихревого слоя, электромеханические активаторы служат для реализации предложенного выше способа и по своей физической сути являются индукторами. Индуктор представляет собой статор с перемещающимися внутри его активной зоны рабочими телами, изготовленными из ферромагнитных материалов.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: nikolajj-limarenko@rambler.ru, nba-shapoval@yandex.ru, zharovvp@mail.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Анализ литературных источников по рассматриваемой тематике позволил установить, что существенное влияние на качество функционирования индуктора оказывает масса рабочих тел [2–10]. Однако, математические зависимости, количественно оценивающие эти взаимосвязи в литературе, в настоящее время отсутствуют.

Поэтому экспериментальное исследование с целью определения влияния массы рабочих тел в камере индуктора на параметры, характеризующие качество его функционирования, является весьма актуальным.

Экспериментальное исследование. Исследование проводилось на индукторе, схема которого представлена на рис. 1.

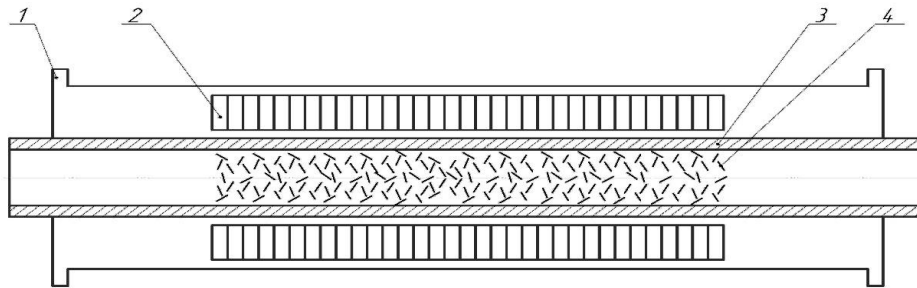


Рис. 1. Схема индуктора:
1 — корпус; 2 — сердечник; 3 — труба; 4 — рабочие тела

Индуктор состоит из корпуса 1, внутри которого расположен цилиндрический сердечник 2 из трансформаторной стали с электрообмотками смещёнными в пространстве друг относительно друга на угол 120° . В его отверстие вставлена труба 3 из парамагнитного материала. Внутри трубы располагаются ферромагнитные рабочие тела 4, которые под воздействием вращающегося переменного магнитного поля совершают перемещение в рабочей зоне индуктора.

Кроме показателей назначения, качество функционирования индуктора характеризуется целым комплексом параметров. Основными из них являются энергетические. Они определяют энергоёмкость процесса и влияют на параметры назначения. К ним относятся:

- сила электрического тока в цепи индуктора, которая характеризуется среднеквадратическим значением фазового тока I_ϕ , А;
- активная электрическая мощность в цепи индуктора, которая характеризуется среднеквадратическим значением P_ϕ , Вт;
- реактивная электрическая мощность в цепи индуктора, которая характеризуется среднеквадратическим значением Q_ϕ , В·Ар;
- полная электрическая мощность в цепи индуктора, которая характеризуется среднеквадратическим значением S_ϕ , В·А.
- магнитная индукция (МИ), модуль которой характеризуется средневыврявленным значением B_m , мТл.

В процессе экспериментального исследования использовались рабочие тела, представляющие собой стержни из ферромагнитного материала диаметром 1,5 мм и длиной 20 мм.

В качестве условий исследования рассматривались:

- напряжение тока на входе индуктора, которое характеризуется среднеквадратическими значениями фазового напряжения U_ϕ , В;
- частота колебания электрического тока в сети равная f , Гц.

Кибернетическая модель системы, иллюстрирующая их взаимосвязь, представлена на рис. 2.

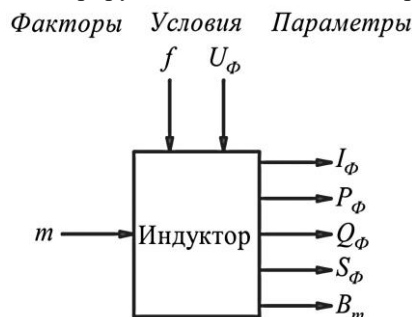


Рис. 2. Блок-схема кибернетической модели системы (входы–индуктор–выходы):

m — масса рабочих тел; f — частота колебаний электрического тока; U_ϕ — напряжение электрического тока на входе индуктора; I_ϕ — сила электрического тока в цепи индуктора; P_ϕ — активная мощность в цепи индуктора; Q_ϕ — реактивная мощность в цепи индуктора; S_ϕ — полная мощность в цепи индуктора; B_m — магнитная индукция

В процессе опытов фиксировались мгновенные значения напряжения $U_{\phi i}$, тока $I_{\phi i}$, частоты f_i и магнитной индукции B_i . В дальнейшем в результате расчётов и автоматизированной статистической обработки с использованием ПК получались требуемые значения измеряемых параметров. Частота фиксации мгновенных значений составляла 0,001 с.

Измерение значений магнитной индукции проводилось портативным универсальным миллитесламетром ТПУ. Работа миллитесламметра основана на измерении магнитной индукции с помощью датчиков в виде преобразователя Холла.

Основная допускаемая относительная погрешность в процентах при измерении средневыпрямленных значений магнитной индукции переменного магнитного поля не превышает значений, рассчитанных по формуле:

$$\Delta_0 = \pm \left[2,5 + 0,2 \cdot \left(\frac{B_{\Pi}}{B_{И}} - 1 \right) \right] = \pm \left[2,5 + 0,2 \cdot \left(\frac{199,9}{62} - 1 \right) \right] = 2,94\%$$

где B_{Π} — предел измерений миллитесламметра, мТл;

$B_{И}$ — показания миллитесламметра, мТл.

Измерение МИ производилось по следующей методике. В рабочей камере индуктора вдоль центральной продольной оси закреплялась направляющая в виде трубы с высокой магнитной проницаемостью, что обеспечивало фиксированное перемещение датчика (рис. 1).

Частота колебания электрического тока в цепи измерялась токоизмерительными клещами-ваттметром АСМ-2353. Погрешность не превышала $\pm 1,2\%$.

Тарировка измерительного канала осуществлялась токоизмерительными клещами-ваттметром АСМ-2353. Погрешность измерения не превышала 0,17 кВт и рассчитывалась по формуле:

$$\Delta_P = \pm (0,03 \cdot P_{ИЗМ} + 5e.m.p.)$$

где $P_{ИЗМ}$ — измеренное значение активной мощности, кВт;

$e.m.p.$ — единицы младшего разряда, кВт,

Масса рабочих тел определялась на весах с точностью до 0,01 г. В процессе исследования устанавливались следующие уровни массы рабочих тел: 0, 200, 400, 600, 800, 1 000, 1 200, 1 400 г.

Измерение значений контролируемых параметров и их первичная обработка осуществлялись с использованием контрольно-измерительного комплекса (КИК), созданного авторами и представленного на рис. 3.

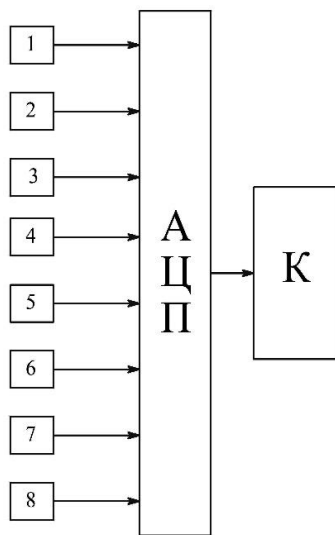


Рис. 3. Блок-схема КИК:

1 — датчик измерения фазового напряжения электрического тока U_{ϕ} на входе индуктора;

2 — датчики измерения фазовой силы электрического тока I_{ϕ} в цепи индуктора;

3 — датчик измерения частоты колебания электрического тока f ; 4 — датчик измерения магнитной индукции B_m ;

5 — датчик измерения активной мощности P_{ϕ} ; 6 — датчик измерения реактивной мощности Q_{ϕ} ; 7 — датчик измерения полной мощности S_{ϕ} ; 8 — датчик измерения массы рабочих тел m ; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; К — компьютер

Все средства измерения, использованные в процессе исследования, прошли сертификацию и соответствовали нормативным документам.

Для уменьшения систематических ошибок была использована рандомизация. Каждый опыт дублировался три раза.

Статистическая обработка экспериментально полученных данных осуществлялась в автоматизированном режиме с использованием программного комплекса Statistica 6.0. Выбранный уровень значимости и коэффициенты корреляции приведены в разделе "Обсуждение и результаты".

После определения оценок коэффициентов, их характеристик и исключения функций из уравнений при статистически незначимых коэффициентах уравнения регрессии приняли вид:

- для зависимости силы электрического тока в цепи индуктора от массы стержней

$$I = -0,0157m + 71,692 ; \quad (1)$$

- для зависимости активной мощности от массы стержней

$$P = -0,0012m + 4,7843 ; \quad (2)$$

- для зависимости реактивной мощности от массы стержней

$$Q = -0,0039m + 17,334 ; \quad (3)$$

- для зависимости полной мощности от массы стержней

$$S = -0,004m + 17,978 ; \quad (4)$$

- для зависимости магнитной индукции от массы стержней

$$B = -0,0226m + 60,842 . \quad (5)$$

По полученным моделям были рассчитаны значения рассматриваемых параметров.

Обсуждения и результаты. Результаты исследования влияния массы рабочих тел на величину силы электрического тока в цепи индуктора представлены на рис. 4.

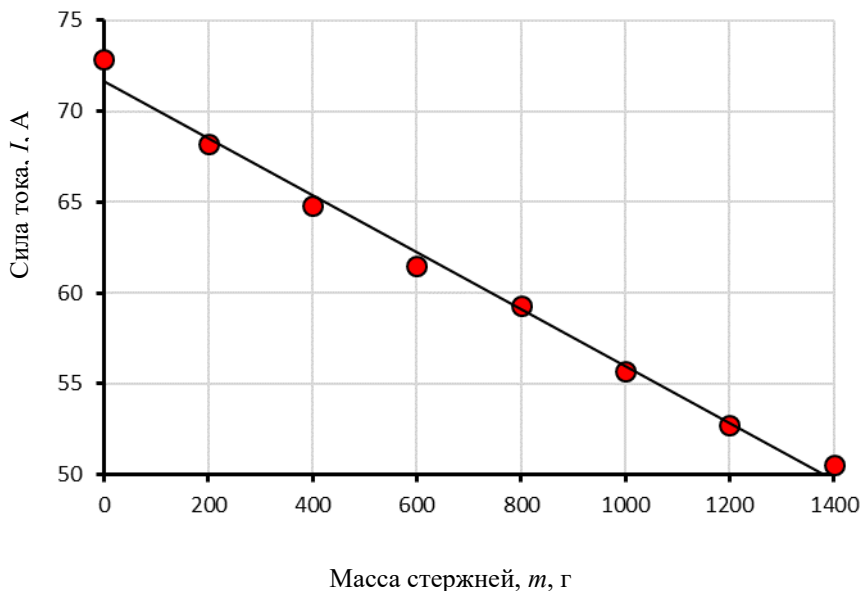


Рис. 4. Зависимость силы тока в цепи индуктора от массы стержней

Анализ уравнения (1) и графической зависимости на рис. 4 показал следующее:

- математическая модель (1) в виде полинома первой степени адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость силы тока в цепи индуктора от массы стержней при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент корреляции $r = 0,9921$;
- с увеличением массы стержней сила электрического тока в рассматриваемом диапазоне значений в цепи индуктора убывает.

Результаты исследования влияния массы рабочих тел на величину активной мощности, представлены на рис. 5.

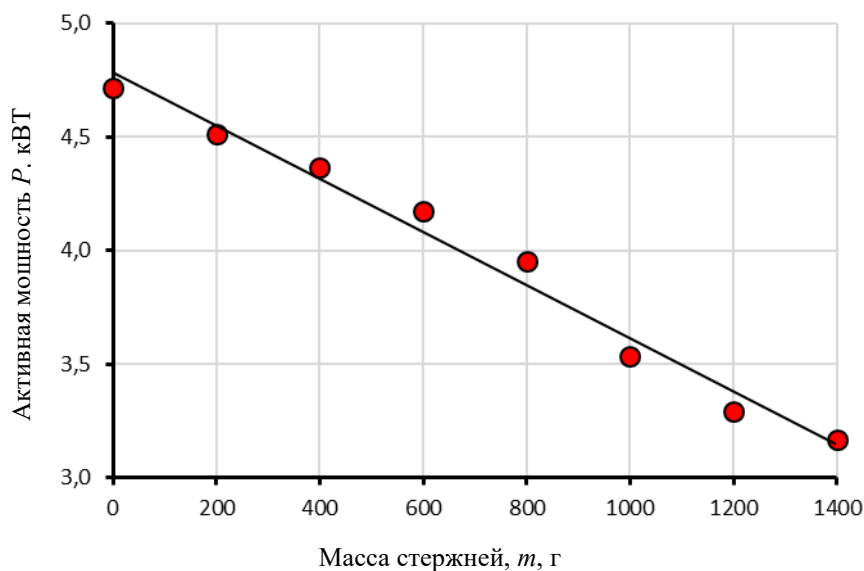


Рис. 5 Зависимость активной мощности от массы стержней

Анализ уравнения (2) и графической зависимости на рис. 5 показал следующее:

– математическая модель (2) в виде полинома первой степени адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость активной мощности от массы стержней при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент корреляции $r = 0,9816$;

– с увеличением массы стержней активная мощность индуктора в рассматриваемом диапазоне значений убывает.

Результаты исследования влияния массы рабочих тел на величину реактивной мощности представлены на рис. 6.

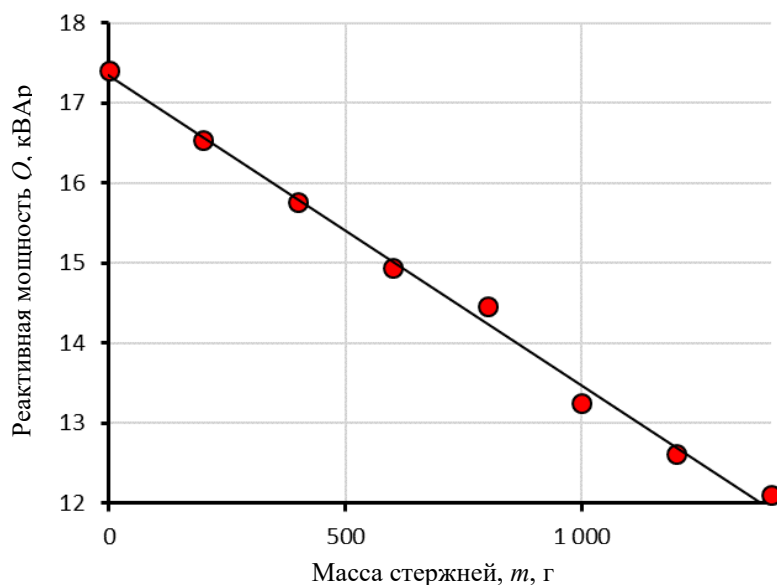


Рис. 6 Зависимость реактивной мощности от массы стержней

Анализ уравнения (3) и графической зависимости на рис. 6 показал следующее:

– математическая модель (3) в виде полинома первой степени адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость реактивной мощности от массы стержней при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент корреляции $r = 0,9942$;

– с увеличением массы стержней реактивная мощность в рассматриваемом диапазоне значений индуктора убывает.

Результаты исследования влияния массы рабочих тел на величину полной мощности представлены на рис. 7.

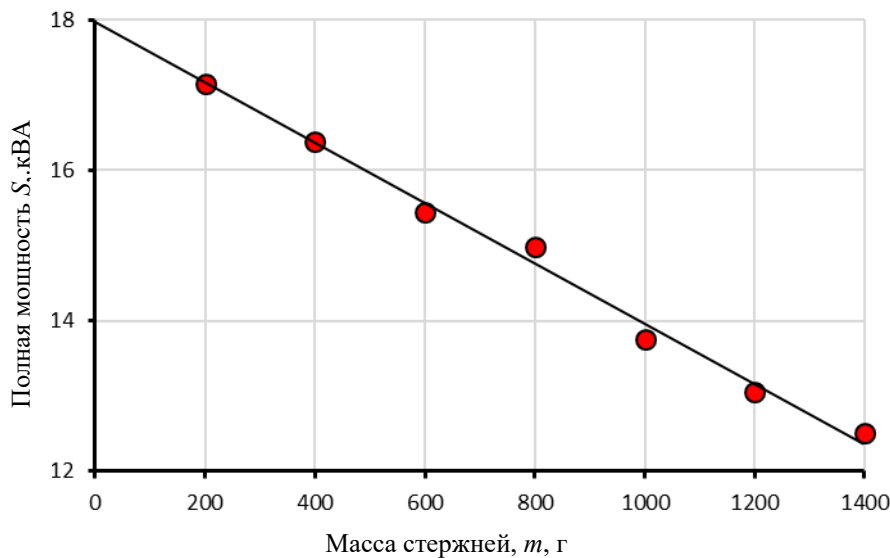


Рис. 7 Зависимость полной мощности от массы стержней

Анализ уравнения (4) и графической зависимости на рис. 7 показал следующее:

– математическая модель (4) в виде полинома первой степени адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость полной мощности от массы стержней при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент корреляции $r = 0,9948$;

– с увеличением массы стержней полная мощность индуктора в рассматриваемом диапазоне значений убывает.

Результаты исследования влияния массы рабочих тел на величину магнитной индукции представлены на рис. 8.

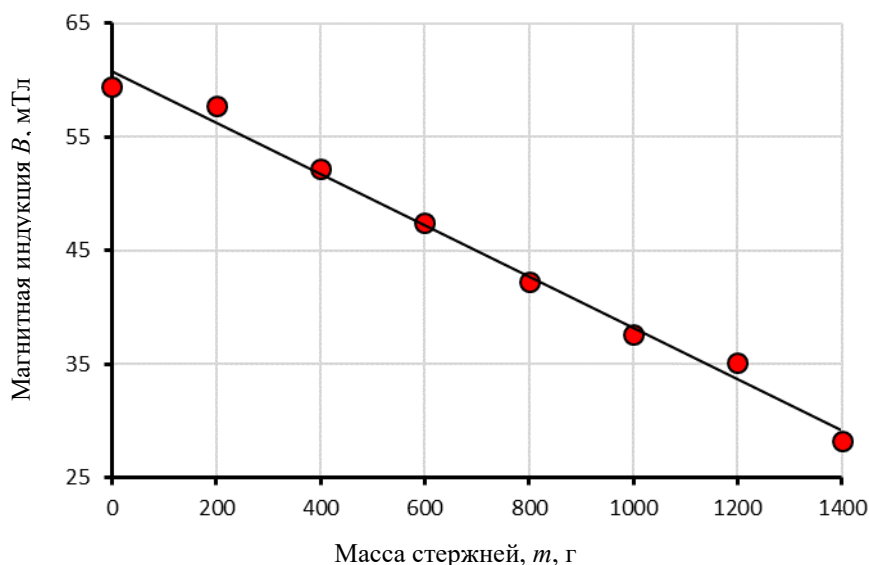


Рис. 8 Зависимость магнитной индукции от массы стержней

Анализ уравнения (5) и графической зависимости на рис. 8 показал следующее:

– математическая модель (5) в виде полинома первой степени адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость магнитной индукции от массы стержней при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент корреляции $r = 0,991$;

– с увеличением массы стержней сила электрического тока в цепи индуктора в рассматриваемом диапазоне значений убывает.

Выводы. Анализ экспериментальных данных позволил установить, что с увеличением массы стержней сила электрического тока в цепи индуктора, активная, реактивная, полная мощность и магнитная индукция в рассматриваемом диапазоне значений убывают. Результаты, полученные в процессе данного исследования, могут быть использованы при проектировании индукторов.

Библиографический список

1. Лимаренко, Н. В. Анализ способов обеззараживания / Н. В. Лимаренко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. трудов 8-й междунар. науч. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 605–608.
2. Адошев, А. И. Ферровихревой аппарат для обеззараживания жидкого свиного навоза : дисс. канд. тех. наук / А. И. Адошев — Ставрополь, 2011. — 190 с.
3. Бахвалов, Ю. А. Синтез электромеханических активаторов с вихревым слоем с применением обратных задач / Ю. А. Бахвалов, Г. И. Володин, В. В. Горчаков, В. В. Гречихин // Математические методы в технике и технологиях. — 2014. — Т.7, №7 (66). — С. 25–27.
4. Вершинин, И. Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / И. Н. Вершинин, Н. П. Вершинин — Сальск : ООО «Передовые технологии XXI века», 2007. — 368 с.
5. Вершинин, Н. П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и в сельском хозяйстве. Экология. / Н. П. Вершинин — Ростов-на-Дону, 2004. — 314 с.
6. Володин, Г. И. Электромеханические процессы в устройствах с произвольной подвижной частью : дис. д-ра техн. наук / Г. И. Володин. — Новочеркасск, 2009. — 304 с.
7. Деревякин, Н. А. Аппараты с вихревым слоем в химической технологии / Н. А. Деревякин, З. А. Михалева. — Москва : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1989. — 284 с.
8. Климов, Е. А. Оценка влияния составляющих нулевой последовательности на эффективность работы электромеханического активатора (аппарата с вихревым слоем) / Е. А. Климов, В. В. Колосков, В. Е. Сапрыкин // Известия ВУЗов. Электромеханика. — 2012. — №1. — С. 67–71.
9. Логвиненко, Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков // Киев : Техника, 1976. — 144 с.
10. Zheng, C. Fresh water disinfection by pulsed low electric field / C Zheng, Y Xu, Z Liu and K Yan // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. Vol. 594. 142-148 p.

References

1. Limarenko, N.V. Analiz sposobov obezzarazhivaniya. [Analysis of disinfection methods.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo ma-shinostroeniya: sb. trudov 8-y mezhdunar. nauch. konf. [The state and prospects of development of agricultural engineering: Proc. 8th Int. Sci. Conf.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 605–608 (in Russian).
2. Adoshev, A.I. Ferrovikhrevoiy apparat dlya obezzarazhivaniya zhidkogo svinogo navoza : diss. kand. tekhn. Nauk. [Ferro-vortex unit for disinfection of liquid pig manure: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Stavropol, 2011, 190 p. (in Russian).
3. Bakhvalov, Y.A., Volodin, G.I., Gorchakov, V.V., Grechikhin, V.V. Sintez elektromekhanicheskikh aktivatorov s vikhrevym sloem s primeneniem obratnykh zadach. [Synthesis of electromechanical actuators with vortex layer using inverse problems.] Mathematical Methods in Engineering and Technologies, 2014, vol. 7, no. 7 (66), pp. 25–27 (in Russian).
4. Vershinin, I.N., Vershinin, N.P. Apparaty s vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem. [Devices with a rotating electromagnetic field.] Salsk: ООО «Peredovye tekhnologii XXI veka», 2007, 368 p. (in Russian).
5. Vershinin, N.P. Ustanovki aktivatsii protsessov. Ispolzovanie v promyshlennosti i v sel'skom khozyaystve. Ekologiya. [Process activation units. Application in industry and agriculture. Ecology.] Rostov-on-Don, 2004, 314 p. (in Russian).
6. Volodin, G.I. Elektromekhanicheskie protsessy v ustroystvakh s proizvol'noy podvizhnoy chast'yu: dis. d-ra. tekhn. nauk. [Electromechanical processes in devices with an arbitrary moving element: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Novocheerkassk, 2009, 304 p. (in Russian).
7. Derevyakin, N.A., Mikhaleva, Z.A. Apparaty s vikhrevym sloem v khimicheskoy tekhnologii. [Vortex layer devices in chemical engineering.] Moscow: TsINTIKhIMNEFTEMASh, 1989, 284 p. (in Russian).
8. Klimov, E.A., Koloskov, V.V., Saprykin, V.E. Otsenka vliyaniya sostavlyayushchikh nulevoy posledovatel'nosti na effektivnost' raboty elektromekhanicheskogo aktivatora (apparata s vikhrevym sloem). [Estimation of the Influence of Zero Phase-Sequence on Overall Performance of Traveling Magnetic Field Type Activator.] Russian Electromechanics, 2012, no. 1, pp. 67–71 (in Russian).
9. Logvinenko, D.D., Shelyakov, O.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem. [Intensification of technological processes in the vortex layer devices.] Kiev: Tekhnika, 1976, 144 p. (in Russian).
10. Zheng, C., Xu, Y., Liu, Z., and Yan, K. Fresh water disinfection by pulsed low electric field. Journal of Physics: Conference Series. 2014, vol. 594, pp. 142-148.

Поступила в редакцию 19.05.2015

Сдана в редакцию 20.05.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.187.66.045

DOI 10.12737/19700

Исследование эффективности электроплавки окатышей в дуговой печи при дожигании оксида углерода топливно-кислородными горелками**

В. А. Степанов¹, Л. Н. Крахт², Э. Э. Меркер³, А. Ю. Кем⁴, Д. А. Харламов^{5}**^{1,2,3,5} Старооскольский технологический институт, г. Старый Оскол, Российская Федерация⁴ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Research of pellet electrosmelting efficiency in arc furnace under the carbon oxide post-combustion by fuel oxygen burners***

V.A. Stepanov¹, L.N. Krakht², E.E. Merker³, A.Y. Kem⁴, D.A. Kharlamov^{5}**^{1,2,3,5} Stary Oskol Technological Institute, Stary Oskol, Russian Federation⁴ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассмотрены особенности нагрева и плавления железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) с применением способа подачи окатышей через осевые каналы электродов. При использовании данной системы подачи железорудного сырья через отверстия в электродах сыпучие окатыши попадают в зону влияния электрических дуг на расплав, что обеспечивает высокую скорость их плавления. При этом улучшаются технико-экономические показатели электроплавки в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Применение топливно-кислородных горелок с подачей кислорода позволяет оптимизировать процесс плавления железорудных металлизированных окатышей, улучшая условия шлакообразования, нагрева, обезуглероживания металла с дожиганием отходящих горючих газов (CO , H_2 , и др.) в дуговой печи.

Some features of heating and melting iron-rich pellets (IRP) by the method of charging the pellets through the axial ducts of electrodes are considered. When using this system of supplying iron ore raw materials through the holes in the electrodes, loose pellets fall into the impact zone of the electric arcs on the melt that ensures a high speed of their fusion. At the same time the technical-and-economic indices of the electrosmelting in the electric arc furnace (EAF) are improved. The use of the fuel-oxygen burners allow optimizing the IRP melting process improving the slagging conditions, heating, metal decarburization with post-combustion of final burning gases (CO , H_2 , etc.) in the arc furnace.

Ключевые слова: металлизированные окатыши, электроплавка, электрод, дуговая печь, дожигание газов, электрическая дуга, горелка.

Keywords: metallized pellets, electrofusion, electrode, arc furnace, gas post-combustion, electric arc burner.

Введение. Производство стали в дуговых сталеплавильных печах — современная технология плавки высокого уровня [1–2]. Эффективность технологии электроплавки железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) зависит от теплового состояния ванны жидкого металла, метода загрузки и скорости плавления ЖМО в ней, окисленности шлака и металла, степени обезуглероживания расплава [3–5]. Известно применение в реальных производственных условиях плавки ЖМО в ДСП топливно-кислородных горелок (ТКГ) для подачи кислорода, газа и угольной пыли с целью интенсификации процессов шлакообразования, нагрева и обезуглероживания в рабочем пространстве печи [6–8].

** Работа выполнена по тематике государственного задания № 11.63.2014/К (НИТУ МИСиС).

** E-mail: Viktor1990_31@mail.ru; lkrakht@mail.ru; merker@inbox.ru; akem@donstu.ru

*** The research is done within the frame of government task no. 11.63.2014/К (NITU MISiS).

Цель настоящей работы — исследование особенностей дожигания оксида углерода в ДСП топливно-кислородными горелками и установление их влияния на эффективность электроплавки ЖМО.

Результаты и их обсуждение. Исследования, выполненные в лабораторных и производственных условиях, показали, что подача ЖМО в расплав ванны дуговой печи, в зону воздействия электрических дуг, интенсифицирует технологические процессы электроплавки стали за счет повышения скорости нагрева и плавления окатышей в расплаве [9–10]. При этом установлено, что быстрый и экономичный нагрев ЖМО в значительной мере определяется скоростью загрузки окатышей в ванну жидкого металла.

Выбор скорости загрузки ЖМО ($V_{ок}$, кг/с) осуществляется с учётом текущего теплового состояния ванны, которое зависит от тепловой мощности печи и скорости плавления порций окатышей ($V_{пл}$, кг/с) в агрегате. При этом общая продолжительность нагрева и плавления окатышей ($\tau_{\Sigma}^{ок}$, с) зависит от общей тепловоспринимающей поверхности слоя ЖМО ($F_{ок}$, м²) и его массы ($\Sigma m_{ок}$, кг).

В работе использовалось следующее обобщающее выражение для расчетов:

$$\tau_{\Sigma}^{ок} = (F_{ок} \cdot n \cdot \rho_{ок} \cdot r_{ок}) / (3V_{ок}), \quad (1)$$

где $F_{ок} = 4\pi \cdot r_{ок}^2$; $r_{ок}$ — радиус окатыша; $\Sigma m_{ок} = n \cdot m_{ок}$; n — количество окатышей; $m_{ок} = (4/3)\pi \cdot r_{ок}^3 \cdot \rho_{ок}$; $\rho_{ок}$ — плотность материала окатыша, кг/м³.

Учитывая, что поверхность порций ЖМО за некоторое время достигает температуры плавления ($T_{пл(нов)}$, °C), а внутри каждого окатыша сохраняется пониженная температура ($T_{ок(в)}$, °C), то суммарное время нагрева и плавления окатыша $\tau_{\Sigma}^{ок}$ будет равно

$$\tau_{\Sigma}^{ок} = \frac{\rho_{ок} \cdot [\overline{C_{ок}}(T_{пл(нов)} - T_{ок(в)}) + \Delta H_{пл}] \cdot r_{ок}}{q_{ок}^{cp}}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{пл}$ — удельная теплота плавления окатыша, Дж/кг; $\overline{C_{ок}}$ — удельная теплоёмкость окатыша, Дж/(кг K); $q_{ок}^{cp}$ — усреднённый тепловой поток на поверхность слоя ЖМО при нагреве его от $T_{ок(в)}$ до $T_{пл(нов)}$, который равен

$$q_{ок}^{cp} = \int_{T_{ок(в)}}^{T_{пл(нов)}} \alpha_{эф} \cdot (T_p - T_{ок(в)}) d\tau, \quad (3)$$

где $\alpha_{эф}$ — эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² K); T_p — температура расплава в печи, K.

Анализ приведённых выражений показывает, что при постоянстве физических свойств ($\rho_{ок}$, $\overline{C_{ок}}$, $\Delta H_{пл}$) и массы окатышей ($m_{ок}$), суммарное время $\tau_{\Sigma}^{ок}$ и скорость их загрузки ($V_{ок}$) в ДСП зависит от факторов теплового состояния ванны (T_p , °C) и эффективности теплообмена ($\alpha_{эф}$) в системе «окатыш — расплав». На рис. 1 представлены результаты расчётов значений $\tau_{\Sigma}^{ок}$ в зависимости от T_p и $\alpha_{эф}$ для разных данных по $r_{ок}$ при условиях подачи ЖМО в зону высоких температур под электроды в печи и вне этих электродов.

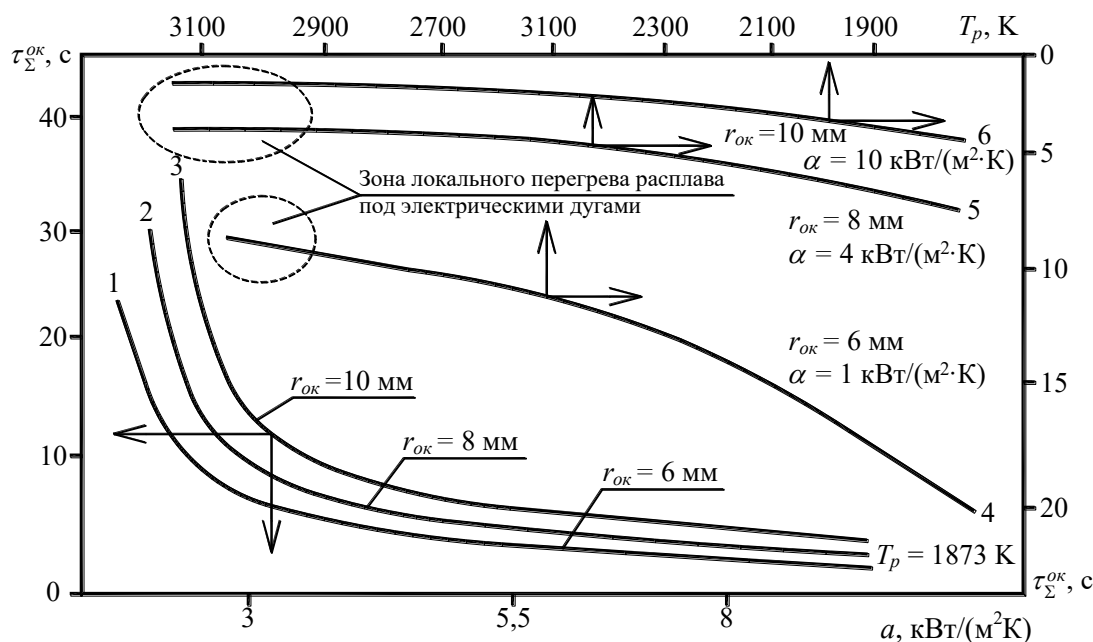


Рис. 1. Зависимость суммарной продолжительности плавления единичного окатыша τ_{Σ}^{OK} от эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{эф}$ (кривые 1–3) и температуры расплава T (кривые 4–6): 1, 2, 3 — τ_{Σ}^{OK} ЖМО радиусом 6, 8, 10 мм при $T_p=1873K$, соответственно; 4, 5, 6 — τ_{Σ}^{OK} ЖМО радиусом 6, 8, 10 мм и коэффициентом теплоотдачи 1, 4 и 10 кВт/(м²·К)

Из полученных данных следует, что продолжительность плавления окатыша снижается ($\tau_{\Sigma}^{OK} \rightarrow \min$) при увеличении $\alpha_{эф}$ и уменьшении $r_{ок}$, причём при подаче ЖМО под электрические дуги (кривые 4, 5 и 6) общее время τ_{Σ}^{OK} в 2–3 раза ниже (кривые 1, 2 и 3), чем при условии подачи окатышей вне зоны непосредственного влияния дуг.

В лабораторных условиях для оценки влияния степени обезуглероживания ванны на скорость плавления ЖМО, металлизированные окатыши расплавляли в тигле с жидким металлом, при этом перемешивание осуществляли продувкой азотом. Оценивали зависимость скорости плавления ЖМО ($V_{пл}$, кг/с) от степени перемешивания расплава (V_{N_2} , м³/с) и содержания углерода в окатышах. Из полученных данных (рис. 2) можно сделать вывод о заметном влиянии на скорость плавления окатышей в металло-шлаковой ванне содержания в них углерода и интенсивности продувки расплава газообразным азотом, что можно соотнести со скоростью обезуглероживания ванны.

В производственных условиях при подаче потока ЖМО через полые электроды в подэлектродное пространство совместно с сыпучими добавочными материалами (известь, коксик) наблюдается повышение вспениваемости шлака, что позволяет повысить эффективность работы ДСП. При этом снижение расхода электроэнергии составило 8,878 ГДж или 16,4 кВт ч/т стали, что согласуется с данными [10]. При подаче кислорода через сопла ТКГ на шлак и металл часть O_2 расходуется на дожигание CO , а остальная часть — на окисление углерода в металле, т.е. $V_c = K_1 \cdot q_0 = f(\Delta[O])$, где K_1 — стехиометрический коэффициент; q_0 — скорость поступления O_2 в расплав, с⁻¹. При этом окисленность металла $\Delta[O] = [O]_{ф} - [O]_p$, где $[O]_{ф}$ и $[O]_p$ — фактическое и равновесное содержание O_2 в объёме металла соответственно. Равновесное с углеродом содержание кислорода в металле равно $[O]_p = p_{co} / (K_C \cdot [C] \cdot f_C \cdot f_0)$, где p_{co} — давление выделения пузырей CO , Н/м²; K_C — константа равновесия реакции окисления углерода; $[C]$ — содержание углерода в расплаве, %; f_C и f_0 — коэффициент активности углерода и кислорода.

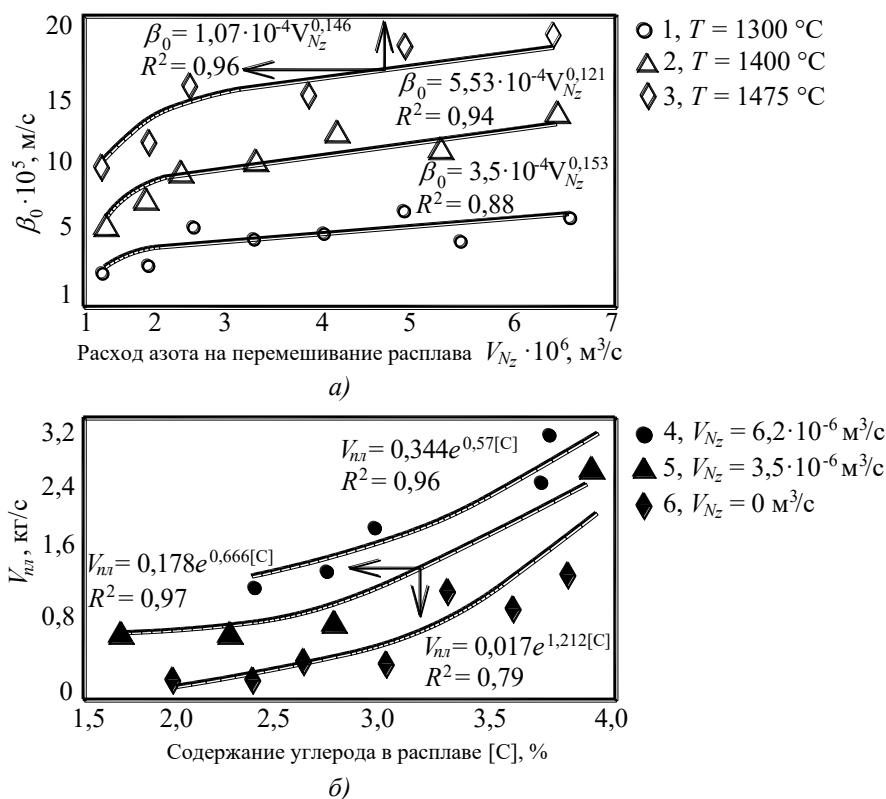


Рис. 2. Зависимость коэффициента массоотдачи от расхода азота при различных температурах его нагрева (а) и влияние содержания углерода в расплаве на скорость плавления окатышей при различных расходах азота (б)

Из анализа приведённых выражений следует, что чем выше содержание $[C]$, тем меньше значение $[O]_p$, а следовательно выше перепад $\Delta[O]$, что приводит к повышению скорости обезуглероживания металла, т.е. $V_c \rightarrow \max$. Это обстоятельство показывает, что вспенивание шлака и погружение электрических дуг в шлак интенсифицирует процессы нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи [5, 7–9, 10].

Эффективность энергосберегающих условий электроплавки ЖМО в ДСП определяется взаимосвязью уровня теплоснабжения ванны (Δq_g , Bm) и фактическим расходом окатышей ($V_{ок}$, кг/с в соответствии с выражением:

$$\Delta q_g = G_\tau \cdot \overline{C}_m \left(\frac{dT}{d\tau} \right) = (G_0 + V_{ок} \cdot \tau) \cdot \overline{C}_m \cdot V_t \quad (4)$$

где $G_\tau = G_0 + V_{ок} \cdot \tau$ — текущая масса металла в печи по ходу загрузки ЖМО в ванну, кг ; G_0 — начальная масса в печи от расплавления скрапа, кг ; \overline{C}_m — средняя теплоёмкость металла в печи, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; τ — время загрузки ЖМО в печь, с ; V_t — скорость нагрева металла в ДСП, $^\circ\text{C/с}$.

После преобразования выражения (4) формула расчёта расхода окатышей по ходу электроплавки имеет вид:

$$V_{ок} = \left(\frac{\Delta q_g}{\overline{C}_m + V_t} - G_0 \right) / \tau. \quad (5)$$

Эффективность электроплавки ЖМО в ДСП определяется необходимостью соблюдения оптимального соотношения между показателями расхода окатышей ($V_{ок}$, кг/с) и скоростью их плавления (V_{nl} , кг/с) в ванне агрегата, т.е. $V_{ок} \leq V_{nl} = m_{ок} \cdot n / \tau$, где $m_{ок}$ — масса окатышей, кг ; n — количество одновременно плавящихся окатышей на поверхности металла под дугами; τ — время плавления окатыша, с . При попадании порций ЖМО в расплав на поверхность испарения металла (менисков под дугами) значение $n = 0,9069 \cdot (3 \cdot S_{мен}) / S_{ок}$, где 0,9069 — коэффициент размещения окатышей в слое при их наилучшем заполнении поверхности менисков ($3 \cdot S_{мен}$, м^2); $S_{мен} = 2\pi(L_\partial + r_\partial) \cdot h$,

где L_d — длина дуги, м; r_z — радиус электрода в печи, м; $S_{ок} = \pi \cdot r_{ок}^2$ — поверхность, которую занимает один окатыш, m^2 ; $r_{ок}$ — средний радиус окатышей, м.

С учётом вышеизложенного оптимальное соотношение для электроплавки окатышей в печи имеет вид: $V_{ок} / V_{пл} = K_{0(x.э.)}$, где $K_{0(x.э.)}$ — критерий оптимального хода плавки стали в ванне ДСП. С учётом преобразований и при $m_{ок} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{ок}^3 \cdot \rho_{ок}$ значение $K_{0(x.э.)}$ имеет вид:

$$K_{0(x.э.)} = \left(\frac{\Delta q_6}{C_m \cdot V_t} - G_0 \right) / \left(\frac{4}{3} \pi \cdot r_{ок}^3 \cdot n \right). \quad (6)$$

Из анализа выражения (6) следует, что если критерий оптимальности больше единицы, то снижается скорость плавления ($V_{пл} \rightarrow \min$), а если $K_{0(x.э.)} < 1$, то скорость загрузки окатышей повышается ($V_{ок} \rightarrow \max$), но при этом падает значение $V_{пл}$ по ходу процесса плавки. По ходу электроплавки ЖМО теплосвоение ванны $\Delta q_6 = Q_6 \cdot \tau / G_\tau$, а загрузку окатышей в дуговую печь осуществляют в зависимости от теплового состояния ванны (Q_6 , Вт · ч/т) с учётом погружения тепла от электрических дуг (Q_Σ^0 , Вт · ч/т) и дожигания (Q_{CO} , Вт · ч/т) оксида углерода (CO) струями кислорода ТКГ во вспененном шлаке агрегата, то есть

$$Q_6 = (Q_\Sigma^0 + Q_{дож}^{CO}) - (Q_{изл}^\phi + Q_{изл}^{шл}), \quad (7)$$

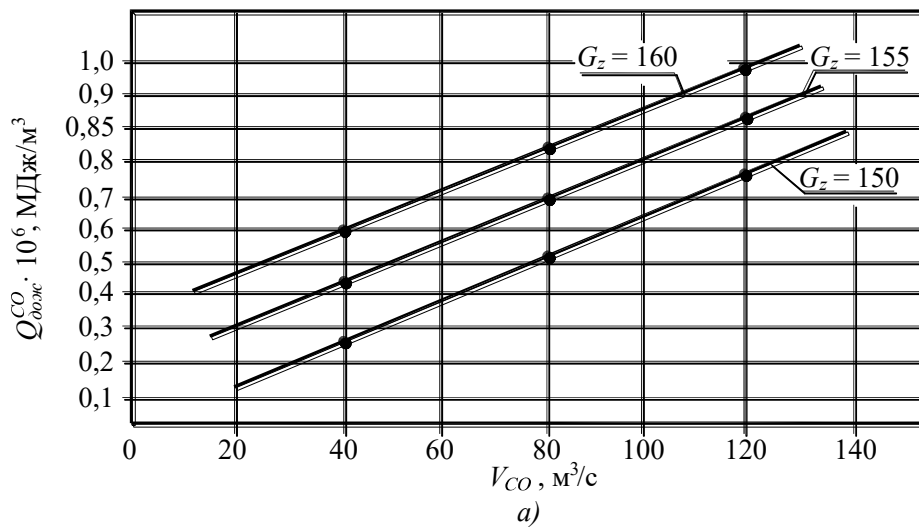
где Q_Σ^0 — тепловая мощность всех электрических дуг в печи, Вт · ч / т; $Q_{изл}^\phi$ и $Q_{изл}^{шл}$ — потери тепла через футеровку и шлаком, Вт · ч/т.

Струи кислорода из сопел ТКГ по ходу движения до поверхности шлака и в объёме шлака взаимодействуют с потоком CO , выделяющегося из ванны, с последующим его дожиганием по реакции $CO + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow CO_2$ с выделением тепла около 12,5 МДж/м³. Объём выделяющегося CO из ванны печи определяется по формуле:

$$V_{CO} = 28 / 12 (V_c \cdot G_\tau + V_{ок} \cdot [C]) / (G_0 \cdot 100 \cdot \rho_{co}), \quad (8)$$

где V_c — скорость обезуглероживания металла в ванне ДСП, %[C]/с; ρ_{co} — плотность газа пузырей, кг/м³. Значение $Q_{дож}^{CO} = V_{co} \cdot Q_{co} \cdot \tau / G_\tau$, где Q_{co} — тепловой эффект реакции дожигания 1 м³ CO до CO_2 , равный ≈ 12500 кДж/м³.

Эффективность режима дожигания CO струями ТКГ во вспененном шлаке оценивается двумя параметрами: КПД дожигания CO , равным $\eta_{CO} = CO_2 / (CO_2 + CO)$ и эффективностью теплопередачи $K_{эф} = \Delta q_E^{CO} / Q_{дож}^{CO}$, где Δq_E^{CO} — доля энергии дожигания CO , переданная шлаковой ванне.



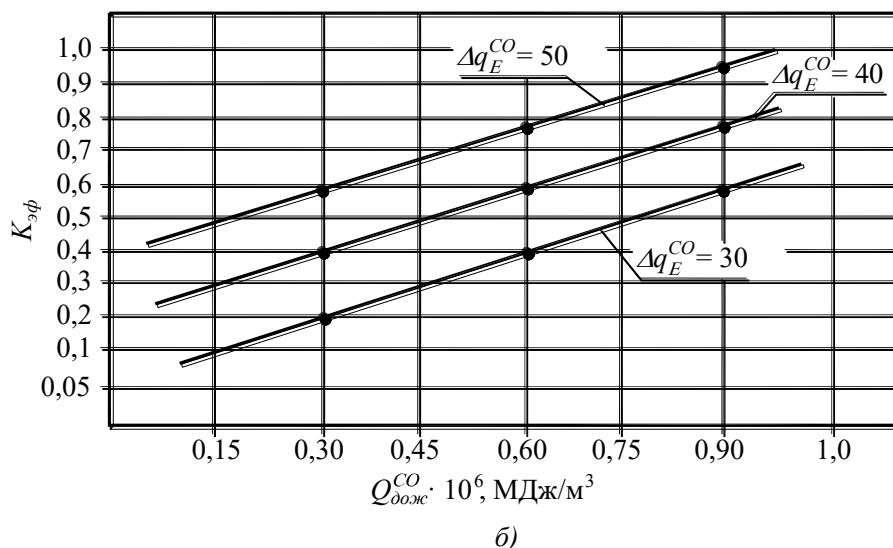


Рис. 3. Зависимость количества выделяемой энергии (а) при дожигании CO ($Q_{дож}^{CO}$, МДж/м³) от скорости его выделения из ванны (V_{CO} , м³/с) при различных значениях массы металла в печи по ходу загрузки ЖМО в расплав (G_{τ} , кг); влияние $Q_{дож}^{CO}$ (б) на коэффициент эффективности теплопередачи от газов к шлаку ($K_{эф}$) при различных долях энергии дожигания CO , передаваемой шлаковой ванне (Δq_E^{CO} , %) в ДСП

Из полученных данных следует, что с увеличением объема выделяемого из ванны CO ($V_{CO} \rightarrow \max$), количество образуемой энергии ($Q_{дож}^{CO}$, МДж/м³) в печи возрастает по мере увеличения массы металла ($G_{\tau} \rightarrow \max$) в ванне. При этом по мере возрастания величины теплоты дожигания $Q_{дож}^{CO}$ коэффициент эффективности теплопередачи ($K_{эф}$) от потока дожигаемого газа к ванне в печи возрастает при создании условий увеличения Δq_E^{CO} . Установлено, что эти условия выполняются при, например, вращении топливно-кислородного факела от ТКГ, повышении скорости его истечения из горелки или увеличении угла её наклона к поверхности ванны.

При организации дожигания CO струями O_2 от ТКГ в условиях заглубления факелов дожигания во вспененный шлак механизм теплопередачи соответствует условиям при погружном горении, которое отличается высокой эффективностью теплообмена ($K_{эф} \rightarrow 1$). Шлаковая ванна нагревается со скоростью 5–10 °С/мин и за счёт интенсивной её циркуляции от обезуглероживания и плавления ЖМО тепло передаётся металлу. Теплообмен между шлаком и ванной металла ускоряется за счёт $V_C \rightarrow \max$ и выбрасывания капель металла в шлак с последующим их оседанием в металл с более высокой температурой. Поскольку скорость поступления в шлак тепла от дожигания CO составляет $Q_{ш} = V_t \cdot G_{ш} \cdot \overline{c_{ш}}$, где V_t — скорость нагрева шлака; $G_{ш}$ и $\overline{c_{ш}}$ — масса шлака и его удельная теплоёмкость соответственно. При массовой скорости поступления капель (брызг) металла в шлак V_k их массовая доля в шлаке будет K , тогда масса металлических капель в шлаке составит $G_k = G_{ш} \cdot K$. При этом продолжительность пребывания капель металла в шлаке будет $\tau_k = G_k / V_k$, а уровень нагрева их за это время равно $\Delta t_k = V_k \cdot \tau_k$, °С. Перенос тепла при оседании капель в ванну металла составит $Q_k = V_k \cdot \tau_k \cdot \overline{c_m}$, где $\overline{c_m}$ — удельная теплоёмкость капель металла, Дж/(кг · °С).

На основе совместного рассмотрения равенств для $Q_{ш}$ и Q_k получим соотношение:

$$Q_{ш} / Q_k = (C_k \cdot K) / (\overline{c_m} \cdot K + (1 - K) \cdot \overline{c_m}). \quad (9)$$

Экспериментально установлено, что с увеличением расхода O_2 , идущего на дожигание CO значения $Q_{дож}^{CO}$, Q_k и V_C возрастают, что интенсифицирует теплопередачу в системе «шлак — металл» за счёт стремления $K_{эф}$ и $\Delta q_{\Sigma}^{CO} \rightarrow \max$. При этом коэффициент полезного теплоиспользования в дуговой печи равен:

$$\eta_{КПТ} = 1 - [(Q_{yx}^2 + q_{ном} \cdot \tau_{nl}) / (Q_{экз}^p + Q_{дож}^{CO} + Q_k)], \quad (10)$$

где Q_{yx}^2 — потери тепла с уходящими газами и пылью; $q_{ном}$ — удельные потери тепла через футеровку агрегата; $Q_{экз}^p$ — тепловой эффект реакции окисления углерода и других составляющих химсостава ЖМО.

Анализ выражений (5), (7)–(10) показывает, что при использовании режима дожигания CO в шлаке струями O_2 от ТКГ параметры V_t , $Q_{CO}^{дож}$, Q_k и $\eta_{КПТ}$ существенно возрастают, что в целом интенсифицирует теплообмен между шлаком и металлом, а это способствует улучшению показателей процесса Δq_{Σ}^{CO} , $K_{эф}$ и $\tau_{пл}$, что приводит к повышению производительности печи и снижению удельного расхода электроэнергии на процессы плавки ЖМО в агрегате.

Расходы кислорода от ТКГ на сжигание топлива и дожигание CO не только интенсифицируют нагрев шлака в печи, но и влияют на окисленность шлака (ΣFeO , %), режимы обезуглероживания и нагрева металла в ДСП при различных расходах окатышей в агрегате.

Выводы. Теплоэнергетические условия электроплавки ЖМО в ДСП при подаче их через трубчатые (полые) электроды с применением ТКГ и дожиганием CO в шлаке являются более выгодными по сравнению с типовым режимом плавления окатышей, когда используются сплошные графитизированные электроды, т.е. при непрерывной подаче металлизированных окатышей в печь вне зоны воздействия на окатыш электрических дуг, так как температура шлакового расплава в этой зоне существенно ниже, чем в расплаве под дугами. При использовании топливно-кислородных горелок в дуговой печи необходим избыток O_2 на дожигание CO в шлаке и вне его, что интенсифицирует нагрев и плавление окатышей в системе «шлак — металл», а это обстоятельство, в свою очередь, способствует улучшению технико-экономических показателей процесса электроплавки стали.

Библиографический список

1. Henrion, R. Perfect electric melting / R. Henrion, F. Schleimer // Iron and Steelmaker. — 1982. — V.9. — № 11. — P. 48–51.
2. Kohiani, T. Features and trend in electric steelmaking for new market mills / T. Kohiani, K.Kudo, S. Murokami // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. — 1981. — № 10. — P. 431–436.
3. Способ электроплавки стали: патент 236009 Рос. Федерация / Э. Э. Меркер, А. А. Гришин, А. И. Кочетов. — опубл. 27.06.2009, Бюл. № 18. — 27 с.
4. Сазонов, А. В. Интенсификация плавления окатышей при их загрузке в зону воздействия электрической дуги на шлаковый расплав / А. В. Сазонов, Э. Э. Меркер, Е. А. Черменёв // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2011. — № 8. — С. 62–64.
5. Черменёв, Е. А. Об эффективности электроплавки стали при загрузке металлизированного сырья через трубчатые электроды в ванну дуговой печи / Е. А. Черменёв, Э. Э. Меркер, О. П. Коберник // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2013. — № 5. — С. 48–51.
6. Меркер, Э. Э. Особенности технологии электроплавки окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, А. В. Сазонов, А. А. Гришин // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. — 2008. — № 2. — С. 31–33.
7. Меркер, Э. Э. Энергосберегающий режим плавки окатышей в 150-т ДСП / Э. Э. Меркер, В. В. Федина, А. И. Кочетов // Электрометаллургия. — 2003. — № 9. — С. 43–44.
8. Меркер, Э. Э. Электроплавка окатышей в дуговой печи / Э. Э. Меркер, В. В. Федина, Д. А. Харламов // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2004. — № 7. — С. 16–19.
9. Меркер, Э. Э. Повышение энергоэффективности электроплавки стали при подаче окатышей в ДСП через каналы в электродах / Э. Э. Меркер, В. А. Степанов // Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2014. — № 1. — С. 41–47.
10. Меркер, Э. Э. Энергосберегающие условия плавления металлизированных окатышей при их подаче через трубчатые электроды в ванну дуговой печи / Э. Э. Меркер, Е. А. Черменёв // Сталь. — 2015. — № 1. — С. 23–28.

References

1. Henrion, R., Schleimer, F. Perfect electric melting. Iron and Steelmaker, 1982, vol. 9, no. 11, pp. 48–51.
2. Kohiani, T., Kudo, K., Murokami, S. Features and trend in electric steelmaking for new market mills. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1981, no. 10, pp. 431–436.
3. Merker, E.E., Grishin, A.A., Kochetov, A.I. Sposob elektroplovki stali: patent 236009 Ros. Federatsiya. [Steel electrosmelting method.] Patent RF no. 236009, 2009 (in Russian).
4. Sazonov, A.V., Merker, E.E., Chermeneyev, E.A. Intensifikatsiya plavleniya okatyshey pri ikh zagruzke v zonu vozdeystviya elektricheskoy dugi na shlakovyiy rasplav. [Intensification of pellets melting under charging them in the impact zone of the electric arc on the melted slag.] Bulletin “Ferrous Metallurgy”, 2011, no. 8, pp. 62–64 (in Russian).
5. Chermeneyev, E.A., Merker, E.E., Kobernik, O.P. Ob effektivnosti elektroplovki stali pri zagruzke metallizovannogo syr'ya cherez trubchatye elektrody v vannu dugovoy pechi. [On efficiency of steel electrosmelting when charging metallized raw materials through the tube wires to the arc furnace bath.] Bulletin “Ferrous Metallurgy”, 2013, no. 5, pp. 48–51 (in Russian).

6. Merker, E.E., Sazonov, A.V., Grishin, A.A. Osobennosti tekhnologii elektroplavki okatyshey v dugovoy pechi. [Features of pellet electrosmelting technology in arc furnace.] *Izvestia. Ferrous Metallurgy*, 2008, no. 2, pp. 31–33 (in Russian).
7. Merker, E.E., Fedina, V.V., Kochetov, A.I. Energoberegayushchiy rezhim plavki okatyshey v 150-t DSP. [Energy-saving mode of pellet melting in 150-t ASF.] *Elektrometallurgiya*, 2003, no. 9, pp. 43–44 (in Russian).
8. Merker, E.E., Fedina, V.V., Kharlamov, D.A. Elektroplavka okatyshey v dugovoy pechi. [Pellet melting in arc furnace.] *Bulletin "Ferrous Metallurgy"*, 2004, no. 7, pp. 16–19 (in Russian).
9. Merker, E.E., Stepanov, V.A. Povyshenie energoeffektivnosti elektroplavki stali pri podache okatyshey v DSP cherez kanaly v elektrodakh. [Improvement in energy efficiency of steel electrosmelting while supplying pellets to ASF through the electrode ducts.] *Bulletin "Ferrous Metallurgy"*, 2014, no. 1, pp. 41–47 (in Russian).
10. Merker, E.E., Chermenev, E.A. Energoberegayushchie usloviya plavleniya metallizovannykh okatyshey pri ikh podache cherez trubchatye elektrody v vannu dugovoy pechi. [Energy-saving metallized pellet melting conditions when supplying them through the electrode ducts to the arc furnace bath.] *Stal'*, 2015, no. 1, pp. 23–28 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.02.2016

Сдана в редакцию 16.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.683.4

DOI 10.12737/19687

Исследование влияния шаблона доступа к глобальной памяти графического процессора на производительность *

Р. В. Арзуманян¹, А. И. Сухинов^{2}**¹ Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study of access template to graphics engine GM effect on the performance ***

R. V. Arzumanyan¹, A. I. Sukhinov^{2}**¹ Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является изучение влияния загруженности вычислительных ядер графического процессора и шаблона обращения к памяти на пропускную способность шины памяти и ускорение масштабирования. Предмет исследования — задача масштабируемости производительности параллельных вычислений и их ускорение. В ходе работы была проверена следующая гипотеза: при обработке изображений для многоядерных систем с общей памятью закон Густафсона — Барсиса более важен, нежели шаблон обращения к памяти при недостаточной загруженности вычислительных ядер графического процессора. Методология проведения исследования — вычислительный эксперимент с последующим анализом полученных данных. В ходе исследования подтверждена выдвинутая гипотеза. Для этого был проведен ряд экспериментов на различных гетерогенных вычислительных системах с поддержкой стандарта OpenCL. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Шаблон доступа к памяти начинает накладывать ограничения на производительность алгоритма только при достаточной загруженности вычислительных ядер. Видеокарты, оснащенные собственной памятью, показывают более стабильные результаты работы по сравнению с теми, что используют память, общую с центральным процессором.

Область применения полученных данных — разработка алгоритмов и программного обеспечения для высокопараллельных вычислительных систем.

The work objective is to study the effect of the graphical processor unit computational cores load level and memory access pattern on the memory bus bandwidth and scaling acceleration. The research subject is the problem of scalability of the parallel computing performance and acceleration. The following hypothesis is checked: while processing images for multi-core shared-memory systems, Gustafson – Barsis's law is more crucial than the memory access template at the underloading of the GPU cores. The research methodology is a computational experiment with further analysis of the obtained results. The conclusions are as follows. The suggested hypothesis is proved. For that, a series of experiments on various heterogeneous computational systems with OpenCL standard support is conducted. The application field of the results obtained includes the development of algorithms and software for the highly parallel computer systems. The memory access template starts to place certain restrictions on the algorithm efficiency only when the load level of the computational cores is sufficient. Video cards with the private memory show more stable results in comparison to those which share memory with the central processing unit.

Ключевые слова: GPGPU, доступ к памяти, OpenCL.**Keywords:** GPGPU, memory access template, OpenCL.

Введение. В настоящее время признано, что графические процессоры (graphical processing unit — GPU) являются мощным инструментом решения задач, хорошо поддающихся распараллеливанию (General-purpose computing for graphics processing units, GPGPU — неспециализированные вычисления на графических процессорах). Однако лишь малая часть существующего программного обеспечения эффективно использует мощности графических процессоров.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: roman.arzum@gmail.com, sukhinov@gmail.com

***The research is done within the frame of the independent R&D.

В качестве причин могут быть названы относительная новизна (широкое распространение технологии GPGPU получили в 2008–2010 гг.) и существенное архитектурное отличие от процессоров приложений (большее количество ядер, малый суммарный объем кэш-памяти).

Вопросу оптимизации алгоритмов для GPU посвящено немало руководств по программированию от ведущих производителей видеокарт. Среди них можно отметить документы от Nvidia [1], AMD [2] и ARM [3]. Во всех перечисленных источниках организация доступа потоков графического процессора к памяти представлена как важный аспект в достижении высокой производительности многоядерных систем. Однако в периодической научной литературе авторам не удалось найти работы, систематически исследующие, каким образом на производительность систем влияет шаблон доступа к памяти различных систем с графическими процессорами. Ранее влияние операций обмена информацией при обращении к памяти и при межпроцессорных пересылках рассматривались в работах [4–6].

В руководствах в общих чертах сказано о том, что доступ к памяти нужно организовывать определенным образом — так, чтобы соседние потоки обращались к соседним ячейкам памяти [1]. Желательно, чтобы при этом использовались векторные операции чтения/записи [2, 3]. На практике это не всегда возможно по ряду причин (шаблон доступа жестко задан алгоритмом, используется структура данных в формате изображения, которая не позволяет организовать такое обращение к оперативной памяти, и т. п.).

В этой связи интересно выяснить, на какой уровень производительности можно рассчитывать при обработке изображений с использованием различных шаблонов доступа, необходимых, чтобы определить, насколько «неудачный» шаблон может снизить скорость работы алгоритма. Также важно ответить на вопрос: является ли доступ к памяти тем фактором, который ограничивает производительность алгоритма в первую очередь? Помимо вышеперечисленного интерес представляет проведение экспериментов на компьютерах, в которых центральный и графический процессоры используют физически общую память, поскольку в данном случае возрастает нагрузка на общий контроллер памяти и результаты могут быть менее предсказуемыми.

Гипотеза. Как и для всякой вычислительной системы с массовым параллелизмом, для GPU важен закон Густафсона — Барсиса [7, 8]:

$$S_p = g + (1 - g)p, \quad (1)$$

где g — доля последовательных расчетов, p — количество процессоров, S_p — ускорение масштабирования.

В качестве модельной выберем задачу копирования изображения с различным числом потоков. Обработка изображений является типичной задачей для GPU. Выдвинем гипотезу: «Количество задействованных потоков в вычислениях оказывает большее влияние на быстродействие алгоритма для GPU, нежели шаблон доступа к памяти при малом количестве потоков». Несмотря на кажущуюся очевидность данного утверждения, не следует забывать о том, что в случае неудачной организации доступа к памяти запросы могут быть сериализованы [1, 2], что приведет к увеличению g .

Цель работы. Предполагается ответить на ряд вопросов.

- Является ли доступ к памяти тем фактором, который ограничивает производительность алгоритмов на GPU в первую очередь?
- Существует ли шаблон доступа, одинаково подходящий для большинства GPU?
- Каков разброс результатов для видеокарт с собственной памятью и тех, что используют память из общего с CPU объема?

Экспериментальная часть. Каждый эксперимент представляет собой запуск OpenCL ядра, которое осуществляет копирование монохромного изображения 384×512 пикселей с 8-битным цветом. При этом используется уникальный шаблон доступа к памяти.

Ширина изображения в пикселах обозначалась W ; высота изображения в пикселах — H , количество потоков по оси OX — Th_x , количество потоков по оси OY — Th_y .

Всего использовалось 9 шаблонов доступа, что дает столько же экспериментов (табл. 1).

Таблица 1

Описание экспериментов

Шаблон	Размерность	Число потоков	Особенности копирования пикселей потоком
Simple	$Th_x=W$ $Th_y=H$	196608	Копирует один пиксел
Row4	$Th_x=W/4$ $Th_y=H$	49152	Векторно копирует строку из 4 пикселей
Row16	$Th_x=W/16$ $Th_y=H$	12228	Векторно копирует строку из 16 пикселей
Col4	$Th_x=W$ $Th_y=H/4$	49512	Поэлементно копирует столбец из 4 пикселей
Col16	$Th_x=W$ $Th_y=H/16$	12228	Поэлементно копирует столбец из 16 пикселей
Row4×4	$Th_x=W/4$ $Th_y=H/4$	12228	В цикле векторно копирует строку из 4 пикселей
Row16×16	$Th_x=W/16$ $Th_y=H/16$	768	В цикле векторно копирует строку из 16 пикселей
Col4×4	$Th_x=W/4$ $Th_y=H/4$	12228	В цикле поэлементно копирует столбец из 4 пикселей
Col16×16	$Th_x=W/16$ $Th_y=H/16$	768	В цикле поэлементно копирует столбец из 16 пикселей

Эксперименты проводились на четырех тестовых компьютерах (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики тестовых компьютеров

Система	CPU	GPU	Тип памяти GPU
Windows 8.1	Core i5 4200U	AMD Radeon 8670M	Дискретная, 1Gb DDR3 800 MHz, 128 bit
Windows 7	AMD A10-5700K		Общая с CPU, DDR3 900 MHz, 128 bit
Linux	ARM CortexA15	ARM Mali T624	Общая с CPU, DDR3 800 Mhz, 64 bit
Windows Server 2008	AMD Opteron 6100	Nvidia Tesla C2075	Дискретная, 6Gb DDR5 3600 MHz, 384 bit

Тестовые ПК можно разделить на две категории:

- 1) процессор и видеокарта используют общую память из объема ОЗУ;
- 2) видеокарта оснащена собственной памятью.

Это важно, потому что использование общей памяти создает дополнительную нагрузку на контроллер памяти.

Стандарт OpenCL позволяет использовать общую память и для видеокарт с дискретной памятью — в этом случае операции чтения/записи выполняются неявно для пользователя. Поэтому эксперименты проводились в двух режимах. Слева на графике (рис. 1) — вариант с использованием памяти видеокарты. Справа — вариант с использованием общей памяти. По оси абсцисс — название эксперимента.

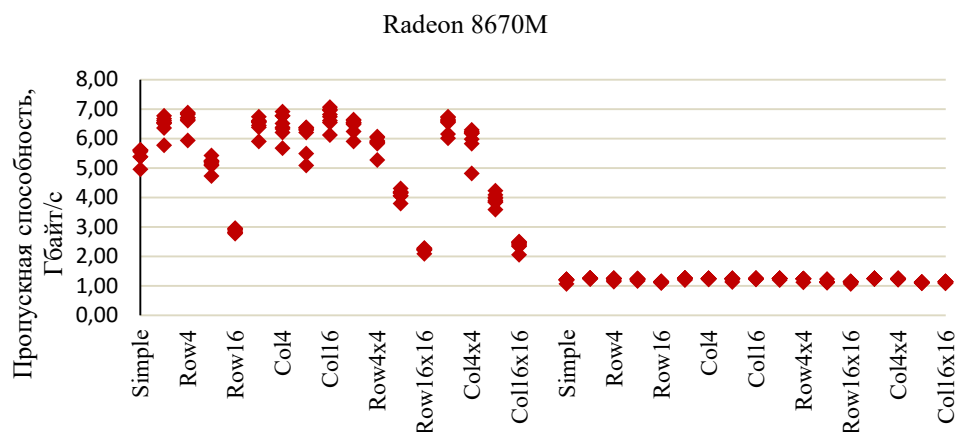


Рис. 1. Экспериментальные результаты для видеокарты AMD Radeon 8670M

Данная видеокарта основана на RISC-архитектуре GCN [8]. При использовании памяти видеокарты пропускная способность почти всегда высокая (около 50 % от пиковой) и всегда стабильная. При использовании разделяемой памяти ограничителем скорости является шина PCI-E 2.0 X4, к которой подключен GPU. Отчетливо видно, что при малом числе потоков (эксперименты Row16×16 и Col16×16) результаты схожи, несмотря на различный шаблон доступа. При этом результаты экспериментов с большим числом потоков (Row16 и Col16) различаются более чем в 2 раза — следовательно, шаблон доступа к памяти в данном случае имеет значение.

Карта Radeon 7660D основана на VLIW-архитектуре Terascale, предшествовавшей GCN. Несмотря на большую пиковую пропускную способность (21 Гбайт/с) по сравнению с предыдущим экспериментом, полученные результаты в среднем хуже и, что более важно, существенно менее стабильны. Ситуация с экспериментами Row16, Col16, Row16×16 и Col16×16 в точности повторяет результаты предыдущей видеокарты (рис. 2).

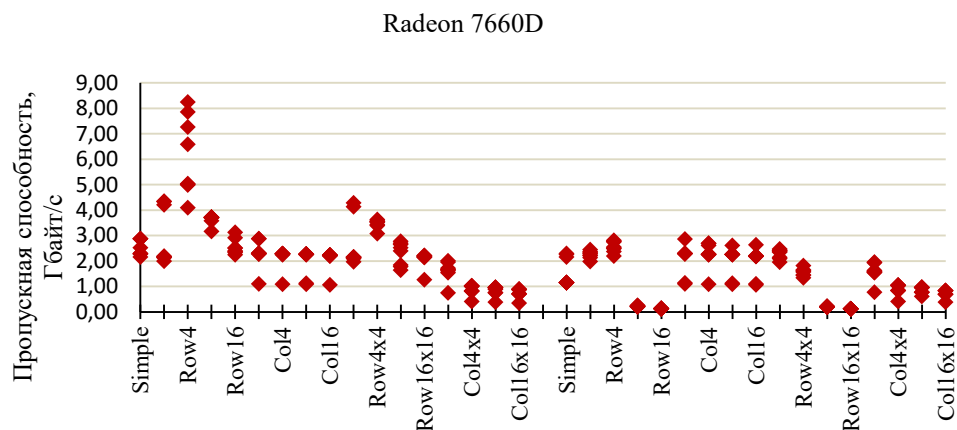


Рис. 2. Экспериментальные результаты для видеокарты AMD Radeon 7660D

Mali T624 — видеокарта для мобильных устройств [9]. Данный GPU основан на VLIW-архитектуре ARM Midgard. В данном случае видна сильная зависимость результата от длины векторных команд чтения/записи. С ростом длины команды пропускная способность также возрастает. В то же время поэлементный доступ к элементам изображения предсказуемо медленный. Примечательно, что использование собственной или разделяемой памяти никак не сказывается ни на пропускной способности, ни на разбросе результатов. В данном случае шаблон доступа к памяти имеет гораздо большее значение, чем число потоков. Это можно объяснить тем, что видеокарта оснащена всего 8 ALU, и даже относительно малое число потоков загружает графический процессор (рис. 3).

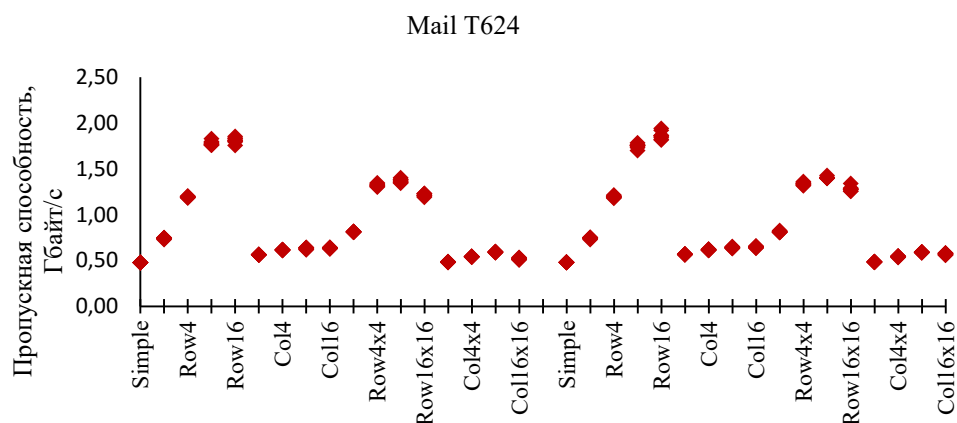


Рис. 3. Экспериментальные результаты для видеокарты ARM Mali T624

Tesla C2075 — это флагманский ускоритель вычислений Nvidia на архитектуре Fermi [10]. Данная карта оборудована 6 Гб собственной памяти. По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что объем задачи недостаточен для такого мощного решения, т. к. максимальная достигнутая пропускная способность составляет всего 12 % от пиковой. Использование собственной или разделяемой памяти никак не отразилось на результатах, потому что ускоритель подключен через шину PCI-E 2.0 X16, которая не является сдерживающим фактором. В данном эксперименте шаблон доступа к памяти также становится важен при большом числе потоков (эксперименты Row4 и Col4). При меньшем числе потоков (эксперименты Row16×16 и Col16×16) шаблон доступа оказывает не такое большое влияние на производительность (рис. 4).

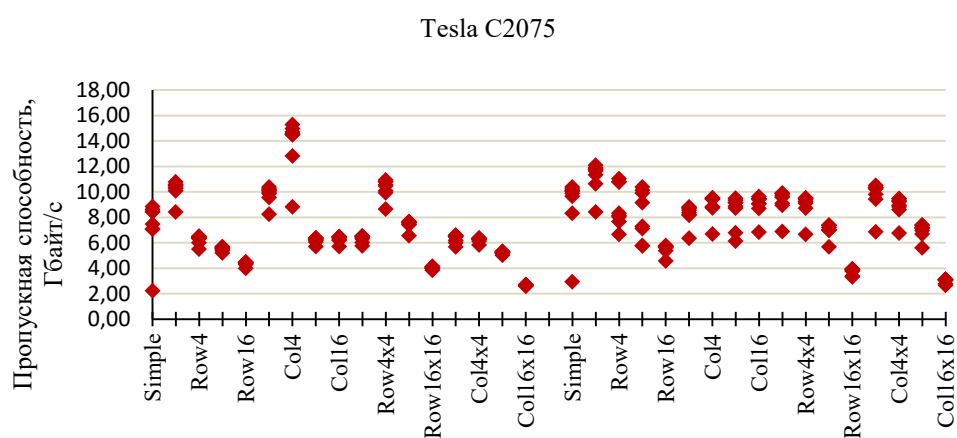


Рис. 4. Экспериментальные результаты для видеокарты Nvidia Tesla C2075

Выводы. По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что для тестовых систем высказанная гипотеза является справедливой — а именно, шаблон доступа к памяти начинает накладывать ограничения на производительность алгоритма только при достаточно большом количестве запущенных потоков.

В ходе экспериментов не найден метод, который показывал бы одинаково хороший результат на всех протестированных системах, несмотря даже на малое их количество.

Видеокарты, оснащенные собственной памятью, предсказуемо показывают более стабильные результаты работы, но при этом накладывают ограничения на совместное использование данных центральным и графическим процессорами. Напротив, видеокарты, использующие общую с центральным процессором память, могут сохранять стабильность результатов при использовании общей памяти, а также давать больший разброс показателей.

Библиографический список

1. OpenCL Programming Guide for the CUDA Architecture / NVIDIA corporation. — Santa Clara : NVIDIA, 2009. — 60 p.
2. AMD Accelerated Parallel Processing OpenCL Programming Guide / Advanced Micro Devices. — Sunnyvale : ADM, 2013. — 294 p.
3. Mali T600 Series OpenCL GPU Developer Guide [Электронный ресурс] / ARM. — Режим доступа: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.dui0538e/DUI0538E_mali_t600_opencldg.pdf (дата обращения: 16.04.16).
4. Сухинов, А. И. Двумерные схемы расщепления и некоторые их приложения / А. И. Сухинов // Москва : МАКС Пресс, 2005. — 408 с.
5. Николаев, И. А. О распараллеливании треугольных итерационных методов на специализированной многопроцессорной системе / И. А. Николаев, А. И. Сухинов, О. Д. Харина // Автоматика и телемеханика. — 1986. — Вып. 5. — С. 135–142.
6. Сухинов, А. И. Локально-двумерные схемы для решения многомерных параболических уравнений на вычислительных системах матричного типа / А. И. Сухинов // Известия вузов. Математика. — 1984. — № 11. — С. 45–53.
7. Encyclopedia of Parallel Computing / Ed. D. Padua. — New York : Springer, 2011. — 2176 p.
8. Quinn, M.-J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP / M.-J. Quinn. — New York : McGraw-Hill, 2003. — 516 p.
9. AMD Graphic Core Next [Электронный ресурс] / Advanced Micro Devices // AMD Fusion Developer Summit 2013. — Режим доступа: http://developer.amd.com/wordpress/media/2013/06/2620_final.pdf (дата обращения: 16.04.16).
10. Global Internet Phenomena Report [Электронный ресурс] / Sandvine. — Режим доступа : <https://www.sandvine.com/trends/global-internet-phenomena/> (дата обращения: 16.04.16).

References

1. OpenCL Programming Guide for the CUDA Architecture. NVIDIA corporation. Santa Clara: NVIDIA, 2009, 60 p.
2. AMD Accelerated Parallel Processing OpenCL Programming Guide. Advanced Micro Devices. Sunnyvale: ADM, 2013, 294 p.
3. Mali T600 Series OpenCL GPU Developer Guide. ARM. Available at: http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.dui0538e/DUI0538E_mali_t600_opencldg.pdf (accessed: 16.04.16).
4. Sukhinov, A.I. Dvumernye skhemy rasshchepleniya i nekotorye ikh prilozheniya. [Two-dimensional splitting schemes and some of their applications.] Moscow: MAKS Press, 2005, 408 p. (in Russian).
5. Nikolayev, I.A., Sukhinov, A.I., Kharina, O.D. O rasparallelivanii treugol'nykh iteratsionnykh metodov na spetsializirovannoy mnogoprotsessornoy sisteme. [On parallel application of triangular iterative methods in a special-purpose multi-processor system.] Avtomatika i Telemekhanika, 1986, iss. 5, pp. 135–142 (in Russian).
6. Sukhinov, A.I. Lokal'no-dvumernye skhemy dlya resheniya mnogomernykh parabolicheskikh uravneniy na vychislitel'nykh sistemakh matrichnogo tipa. [Locally two-dimensional schemes for solving multidimensional parabolic equations in computer systems of matrix type.] Izvestiya VUZ. Matematika, 1984, no. 11, pp. 45–53 (in Russian).
7. Padua, D., ed. Encyclopedia of Parallel Computing. New York: Springer, 2011, 2176 p.
8. Quinn, M.-J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. New York: McGraw-Hill, 2003, 516 p.
9. AMD Graphic Core Next. Advanced Micro Devices. AMD Fusion Developer Summit 2013. Available at: http://developer.amd.com/wordpress/media/2013/06/2620_final.pdf (accessed 16.04.16).
10. Global Internet Phenomena Report. Sandvine. Available at: <https://www.sandvine.com/trends/global-internet-phenomena/> (accessed: 16.04.16).

Поступила в редакцию 29.01.2016

Сдана в редакцию 29.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК539.2

DOI 10.12737/19692

Band structure and magnetic properties of cubic crystals $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$: Ab initio calculations*

V. V. Plyasov¹, I. V. Ershov², T. P. Zhdanova³, I. Ya. Nikiforov^{4**}^{1,2,3,4} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Зонная структура и магнитные свойства кубических кристаллов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$: Ab initio расчёты***

В. В. Илясов¹, Т. П. Жданова², И. В. Ершов³, И. Я. Никифоров^{4**}^{1,2,3,4} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Band structure of solid solutions $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ with sphalerite structure and with considerable percentage of indium ($x = 0,25; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75; 0,9; 0,95; 0,97; 0,99; 1,0$) is calculated using the density-functional theory (DFT) and the cluster version of the local coherent potential method within the frame of the multiple scattering theory. The electron structure of the ternary solutions of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ in sphalerite crystallographic modification is compared; the interpretation of their features is given. The concentration dependence on the energy gap for the entire variation range of the indium content in the solution is obtained. The spin polarization effect of the states of In, Ga, and N for the alloys with the considerable percentage of In, as well as the transition of the ternary solutions of $\text{In}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$ into the of magnetic semiconductor state is found out. The magnetic moments of In, Ga, and N atoms, and the saturation magnetization in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ semiconductor system are determined.

Зонная структура твёрдых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ со сфалеритной структурой и большим содержанием индия ($x = 0,25; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75; 0,9; 0,95; 0,97; 0,99; 1,0$) рассчитана методами теории функционала плотности (DFT) и кластерной версии локального когерентного потенциала, в рамках теории многократного рассеяния. Проведено сравнение электронной структуры тройных растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ со сфалеритной кристаллографической модификации, дана интерпретация их особенностей. Получена концентрационная зависимость ширины запрещённой полосы для всего диапазона изменения содержания индия в растворе. Обнаружен эффект спиновой поляризации состояний In, Ga и N для растворов с большим молярным содержанием In и переход тройных систем $\text{In}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$ в состояние магнитного полупроводника. Определены магнитные моменты на атомах In, Ga и N и намагниченность насыщения полупроводниковой системы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Keywords: band structure, magnetic moment, valence band, band gap, density of electronic states.

Ключевые слова: зонная структура, магнитный момент, валентная зона, ширина запрещённой полосы, плотность электронных состояний.

Introduction. The semiconductor solid solutions $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ are the most promising materials for optoelectronics to obtain the blue and green light-emitting diodes which are used for high-density optical storage of information and high-power devices, for blue lasers for instance. The extraordinary property of these materials is the ability to operate over a wide temperature range and the insensitivity to X-ray irradiation [1, 2]. By varying of the indium percentage one can manage the value of the energy gap in the range from 1.92 eV (c-InN) [3] upto 3.2 eV (c-GaN) [3] that gives the opportunity to use these materials in various parts of spectrum [4, 5]. For the far ultraviolet region (240-300 nm) the semiconductor materials based on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0,5 < x < 1$) crystals are of high interest.

The alloys $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ with the high percentage of indium are studied not sufficiently in comparison with other nitrides of III group elements because of the difficulties connected with the growing of such crystals [6]. On the top of c-GaN buffer lay it is possible to grow up a film of alloy In-Ga-N of high quality with cubic structure [3, 7] using the method of gas-source molecular beam epitaxy. The theoretical investigation of these alloys $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x \leq 0,75$) were performed using the densi-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: viily@mail.ru, thijd@mail.ru, zhdanovatp@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ty-functional theory (DFT) in the local density approximation (LDA) [2, 4]. The structural, thermodynamical properties, and the composition dependence of bowing parameter of the calculated band gap have been determined. It was shown that this bowing parameter was due to structure effect that is to the structure induced disordering of the bond lengths, and depends on the fraction of indium. Nevertheless the mechanism of the influence of indium atoms on the energy gap in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloy has not been elucidated, for $0.75 < x < 1$ especially.

The heightened interest to the search of new so called magnetic semiconductors (MS) is due to their key role for creation of new devices of spintronics [8, 9]. The most traditional way is to admix magnetic d-atoms, Mn-atoms for example, into the semiconductor matrix GaN. It leads to the rise of special magnetic properties particular for ferromagnetic materials with the high Curie temperature [10]. The admixture of Ga-atoms into the epitaxial films of GaN as was shown by magnetometry [11] results in the origin of the giant magnetic momentum at gadolinium atom. The alloyed layers of GaN:Gd demonstrate the ferromagnetism with the temperature of transition into magnetic order state higher than room temperature. Because of this the system GaN:Me looks promising for spin electronics.

Quite other way of creation of dilute magnetic materials is possible using effect of spin polarization by admixture of non-magnetic atoms into the non-magnetic matrix. For instance for BeO: (B, C, N) system it was shown [12], that by the partial substitution oxygen atoms in BeO by atoms boron, carbon or nitrogen the spin polarization of $(2p_{\uparrow} - 2p_{\downarrow})$ -states occurs, and the system BeO : X becomes to be magnetic semiconductor (BeO : B) or magnetic semimetal (BeO : C, N). The ternary systems $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and the binary basic systems GaN and InN are usually considered as non-magnetic semiconductors. Because of this there are no publications with spin-polarized calculations of zone structure of such materials.

In the present work the zone structure, forbidden energy band bowing and magnetic properties of wide band semiconductors $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ with the great percentage of indium using the methods of functional density theory (spin-polarized version) and the cluster version of local coherent (spin-restricted version) were investigated.

Models and methods. The crystallographic structure of the ternary system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ is of cubic sphalerite-type, its space group is $\bar{F}43m$. The coordination polyhedral (CP) of the atoms In and Ga are tetrahedral $[\text{MeN}_4]$. Interatomic distances are supposed to be: $\text{Ga} - \text{N} = \text{In} - \text{N} = a\sqrt{3}/4$, where a is the lattice parameter, which was determined according to Vegard's law.

Zone calculations of electron structure of nitrides $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0; 0.25; 0.5; 0.6; 0.7; 0.75; 0.9; 0.95; 0.97; 0.99; 1.0$) were performed with the spin-polarized full-potential method of pseudopotential (program package Quantum-Espresso [13]) using the theory of the functional density (DFT) developed by Kohn and Sham [14]. In this theory the total energy of the unite cell is the sum of the one-electron energy, Hartree energy, exchange-correlation energy, and electrostatic Ewald energy, and the non-local exchange-correlation functional in the form Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) [15].

The following electron configurations of atoms have been used: In — $[\text{Kr}]5s^25p^14d^{10}$, N — $[\text{He}]2s^22p^3$, Ga — $[\text{Ar}]4s^24p^13d^{10}$. For atoms In, Ga and N the electrons in the states $5s^25p^14d^{10}$, $4s^24p^13d^{10}$, and $2s^22p^3$ were attributed to valence ones correspondingly, whereas the electrons of completely occupied shells [Kr], [Ar], and [He] were considered as core-electrons. The influence of core-electrons was taken into account by using ultrasoft pseudopotentials for indium atom (code Dal Corso [13]) whereas for gallium and nitrogen atoms the code Vanderbilt (versions 735 и 734) [15] was used.

The plane waves set was "cut off" at the energy 20 Ry that provided the convergence of the total energy of the cell in our self-consistent calculations not worse than 0,001 Ry. The density of electron states was calculated using the rectangular grid of points of dimensions $4 \times 4 \times 4$, spaced evenly throughout the Brillouin zone (Monkhhorst-Pack grid).

The electron densities $\rho(r)$ in the real space and the partial densities of electron states (DOS) in valence and conduction bands were calculated separately for every spin projection similar way as in [12]. It gave us the possibility to determine connected with spin magnetic moment at every atom.

To investigate the electron structure of the system Ga-In-N with the great fraction of indium the local coherent potential ab initio method in the frame of multiple scattering theory was used. This method was developed in our group and applied for many systems, for Ti-Al-C system for instance [16]. The approximation of virtual crystal is quite effective approach for the system under investigation with the percentage of an element of any possible value. The muffin-tin approximation for crystal potential was used. The latter was the sum of Coulomb, exchange (Slater's version) and Madelung contributions. The local

partial densities for every component of alloys was calculated for cluster of 250 atoms of the system In-Ga-N according to expression

$$n_1^{\text{In}}(E) = \frac{-\sqrt{E}}{\pi} \int_0^{R_{\text{WS}}} \{r R_l^{\text{In}}(r, E)\}^2 dr \frac{\text{Im Tr } T_{lm,lm}^{00,\text{In}}}{\text{Im } t_l^{0\text{In}}}$$

where l is the orbital quantum number, $R_l(r, E)$ are the radial wave functions, T is a matrix element of the scattering operator, and index 0 shows the centre at which the atom In is placed.

Results and discussion.

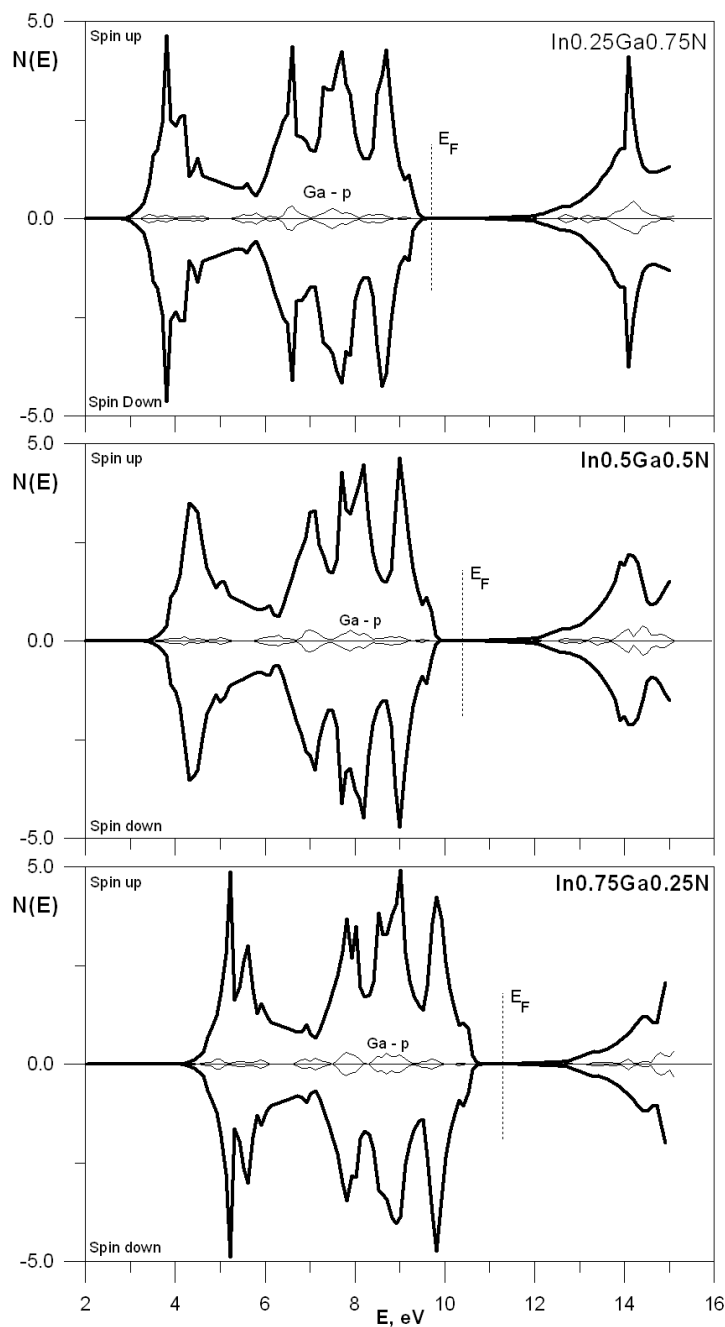


Fig. 1 – Total densities of states for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.25; 0.5; 0.75$).

Band structure and magnetic properties. The band structure of cubic $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ system changes significantly as the molar fraction x of indium increases. It concerns both occupied valence and unoccupied conduction bands. In Fig. 1 the total

electron densities of states for both spin orientations (TDOS) for solid solutions $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.25; 0.5; 0.75$) are shown. One can see the features in comparison to TDOS of the c-GaN (Fig.2).

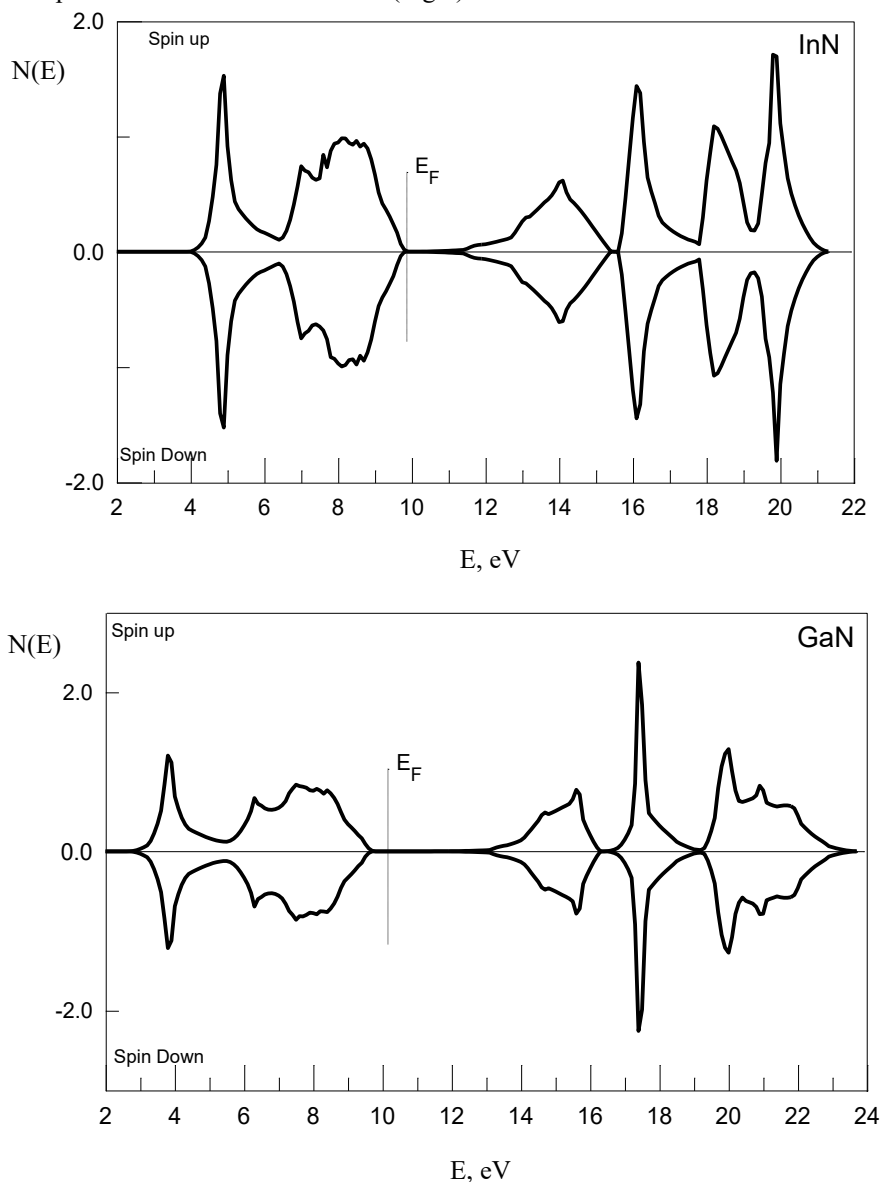


Fig. 2 - Total densities of states for InN and GaN ($x = 0.25; 0.5; 0.75$).

The most significant changes of electron structure happen for $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ and $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$. These changes are connected with the interaction In4d- and Ga3d-orbitals with 2p-orbitals of nitrogen which results in the changes of the electronic and magnetic properties of the system under consideration.

The valence band (VB) is formed by states essentially of 2p-electrons of nitrogen atoms with the admixture of s- and p-states of Ga and In and distinguishes the high energy localization of In5s- (3,8 eV), In5p- and Ga4p- (6,6 eV and 7,7 eV), and 2p-states of nitrogen (8.7 eV). The corresponding maxima of TDOS for both spin orientations can one see for all alloys. At the same time for $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ there are some band gaps which can be seen on the curves of local densities of electron states for both spin subsystems $N_{\uparrow}(E)$ и $N_{\downarrow}(E)$ of indium, gallium and nitrogen, as well as appearance of unoccupied states of In5s- and Ga4s-electrons at 0,6 eV from Fermi level (Fig.3) which can be treated as acceptor level.

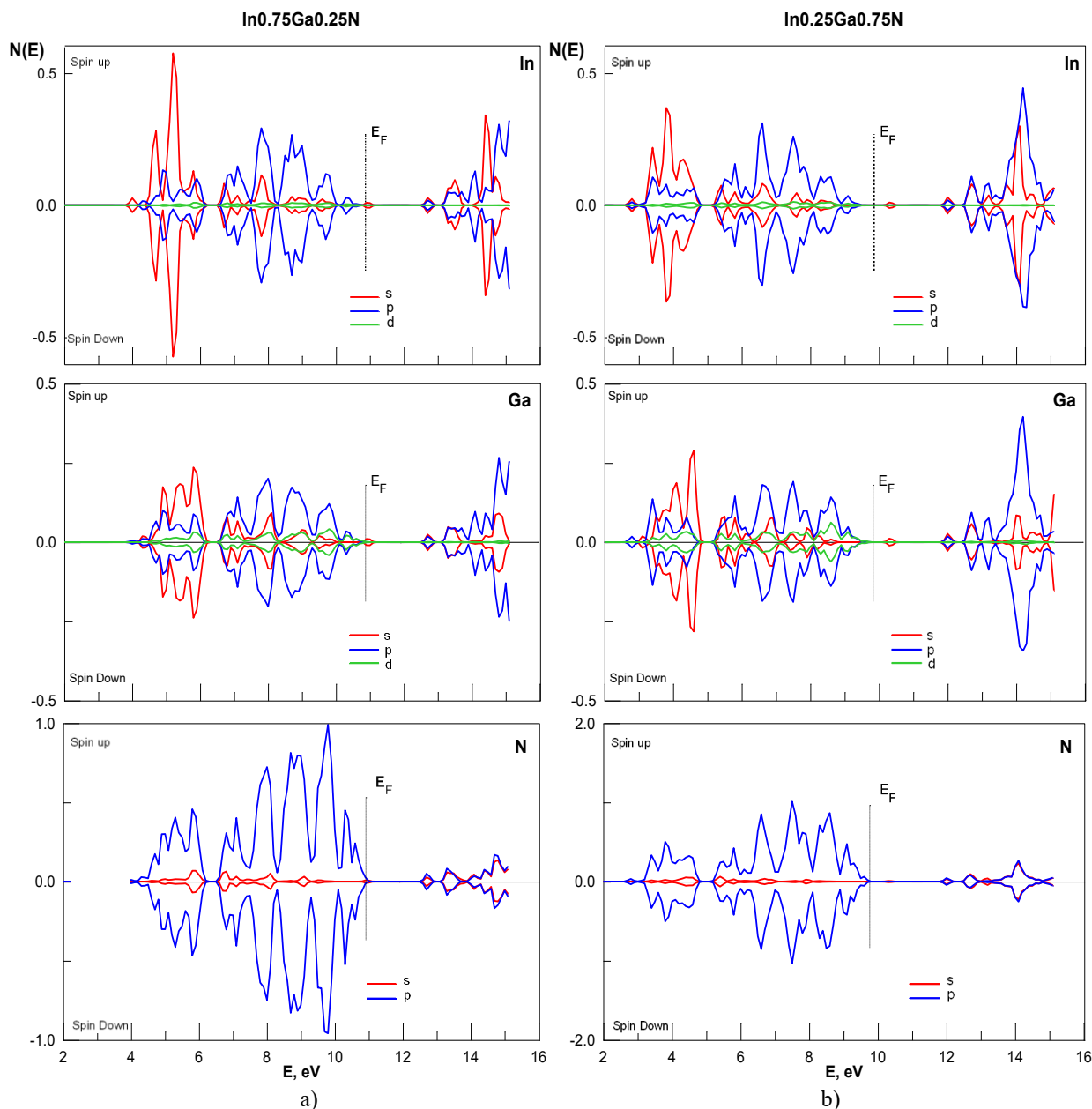


Fig. 3. Partial atomic densities of states for $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ (a) and $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ (b)

At significant molar fraction of indium (for example $x = 0,75$) the bands of occupied and free electron states shift to the greater energies by more than 1,0 eV in comparison to $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$. The energy gap E_g of $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ decreases by 0.5 eV and is equal to 1,9 eV.

By integration of electron local partial densities for every spin projection for the systems $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$) provides us the local partial charges of atoms and the possibility to determine the spin magnetic moments at every kind of atoms (Table1). It was ascertained that the ternary system under investigation displayed rather small magnetic moment at atoms Ga, In, and N, which value increases in the row $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N} \rightarrow \text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N} \rightarrow \text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$. The greatest spin splitting takes place for 4p-shell of gallium atom, that causes the appearance of magnetic moment at Ga atom $0,009\mu_B$, whereas the magnetic moments at atoms of matrix indium and nitrogen in $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ are equal to $0,008\mu_B$. In this system, when $x = 0.75$ the Ga atoms can be considered as admixture atoms.

Table 1.

The structural parameters, magnetic moments at atoms and absolute magnetization M_s (at $T = 0\text{ K}$) in the systems $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

	Lattice parameter, Å	Cell volume, (a.u.) ³	Magnetic moments, μ_B			M_s , μ_B/cell
			In	Ga	N	
c-GaN	4,500	153,73	-	0,009	- 0,009	0,05
$\text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$	4,655	680,69	0,006	0,007	0,007	0,17
$\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$	4,740	718,67	0,007	0,008	0,008	0,18
$\text{In}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$	4,770	732,40	0,009	0,009	- 0,008	0,19
c-InN	4,980	208,36	0,010	-	0,010	0,06

It is worth to mention that in binary compounds GaN and InN there are magnetic moments. For instance for c-GaN are there magnetic moments at atoms Ga ($0,009 \mu_B$) and N ($- 0,009 \mu_B$), but it does not lead to the ferromagnetism of this compound because two sublattices are magnetized antiparallel ways. These results agree with the molecular Weiss' theory, according to which the magnetization of every sublattice $M^{A,B}$ is determined by the sum of average statistical magnetization of separate ions $\ll \mu^{A,B} \gg$ by analogy with [17] $M^{A,B} = \frac{N}{2} \ll \mu^{A,B} \gg$, where N - the number of atoms and $\ll \mu^{A,B} \gg$ - a quantum-mechanical average magnetic moment of the n -level.

Thus the resulting magnetization in binary and ternary systems $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$) is the sum of the magnetization of magnetic sublattices and is determined by the set of levels E_n in common nearly the ground state. Our *ab initio* calculations of the electron structure and the total and the absolute magnetization of binary and ternary systems gave for the total magnetization the zero estimation $M = 0$ but the absolute magnetizations $M_s > 0$ is different from zero (Table 1). The magnetization of saturation M_s (for $T = 0\text{ K}$) of the semiconductor materials under investigation increases monotonous way with x and achieves $0,19 \mu_B/\text{cell}$ for $x = 0,75$, being small for all x . It is possible to suppose that the systems GaN, InN, and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ are in paramagnetic state. The appearance of ferromagnetic properties of GaN layers by admixture of Gd atoms was noted earlier [11], and was connected with the giant magnetic moment at the atom of gadolinium. Unfortunately the measurements of the magnetic moments at atoms of Ga and N have not been carried out.

The creation of magnetic moments at atoms of nitrogen ($0,42 \mu_B$) was observed in BeO : N [12] by the partial substitution of oxygen atoms by nitrogen atoms. The nature of the creation of magnetic properties of nitrogen atoms in the system BeO : N the authors of paper [12] explain by the mutual energy position of the valence $\text{O}2p$ -band of matrix and $2p$ -band of nitrogen atoms which is determined by the difference of orbital energies $\Delta\epsilon$ ($\text{O}2p - \text{N}2p$) = $-1,749\text{ eV}$, that leads to the spontaneous polarization of $\text{N}(2p_{\uparrow} - 2p_{\downarrow})$ -states and converts the system BeO : N into the state of magnetic semimetal (MSM). It was shown [12] that by diminishing of the difference of the orbital energies $\Delta\epsilon$ in the system BeO : (B, C, N) the magnetic moments of admixturing atoms decrease noticeably (from $1,16 \mu_B$ for BeO : B to $0,42 \mu_B$ for BeO : N), magnetic moments at atoms of beryllium and oxygen as well as the total magnetization of such system decrease also.

However for the semiconductor system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ the results of the work [12] about the role of the mutual positions of p -orbital energies of admixtural atoms and the atoms of non-metallic lattice cannot be used because alloying in the system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ is performed into metallic sublattice and secondly, the energy of $2p$ -orbital of nitrogen ($-11,4852\text{ eV}$) [18] is situated lower than the energies of p -orbital In ($- 4,6947\text{ eV}$) [18] and Ga ($- 4,9218\text{ eV}$) [18]. The differences of energies $\Delta\epsilon$ of p -orbitals in one case are equal: for nitrogen $\Delta\epsilon$ ($\text{Ga}4p - \text{N}2p$) = $6,563\text{ eV}$ and for indium $\Delta\epsilon$ ($\text{In}5p - \text{Ga}4p$) = $0,227\text{ eV}$. So for instance in the system $\text{In}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$ the magnetic moment at the atom nitrogen is more than 4 times less than in system BeO:N, that can be connected with the influence of the element composition of matrix, crystallographic and electron zone structures.

The analysis of the partial charges of both spin subsystems $N_{\uparrow}(E)$ and $N_{\downarrow}(E)$ in the semiconductor alloy $\text{In}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$ (Table 2) allows us to state that spontaneous spin polarization of the electron states Ga ($4p_{\uparrow} - 4p_{\downarrow}$), In ($5p_{\uparrow} - 5p_{\downarrow}$), and N ($2p_{\uparrow} - 2p_{\downarrow}$) give main contributions into magnetic moment when there are no external magnetic fields. The contributions into magnetization of lattice ions of the electrons of $\text{Ga}4s$ -, $\text{In}5s$ -, and $\text{N}2s$ -orbitals turn out to be 2 times less than of their p -electrons. It is while to note that $\text{Ga}3d$ - and $\text{In}4d$ -states of the valence band electrons make no noticeable contribution into the magnetic moments at atoms of the system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Table 2.

Partial charge distribution of valence electrons at atoms for the spin subsystems $N\uparrow(E)$ и $N\downarrow(E)$ in $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$

	In			Ga			N	
	s	p	d	s	p	d	s	p
$n\uparrow$	0,3819	0,6840	4,9855	0,4342	0,7205	4,9967	0,7473	2,1651
$n\downarrow$	0,3797	0,6790	4,9856	0,4313	0,7143	4,9967	0,7480	2,1721
$(n\uparrow - n\downarrow)$	0,0022	0,0050	-0,0001	0,0029	0,0062	0,0000	-0,0007	-0,0070
Σ	0,7616	1,3631	9,9711	0,8655	1,4347	9,9934	1,4953	4,3372

The dependence $E_g(x)$. By increasing of the molar fraction of indium in the system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ in spite of significant change of the electron energy structure both in occupied and unoccupied bands, it is possible to state that the width of the valence band conserves its value, the VB and Fermi level shift by more than 1 eV to the higher energies, and the width of forbidden energies E_g decreases from 2,4 eV ($x = 0,25$) to 1,9 eV ($x = 0,75$). The calculated composition dependence $E_g(x)$ in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$) appears to be nonlinear one and is shown in Fig. 4, where it is compared with the experimental data [2]. One can see the good agreement of received theoretically in the present work and experimental data.

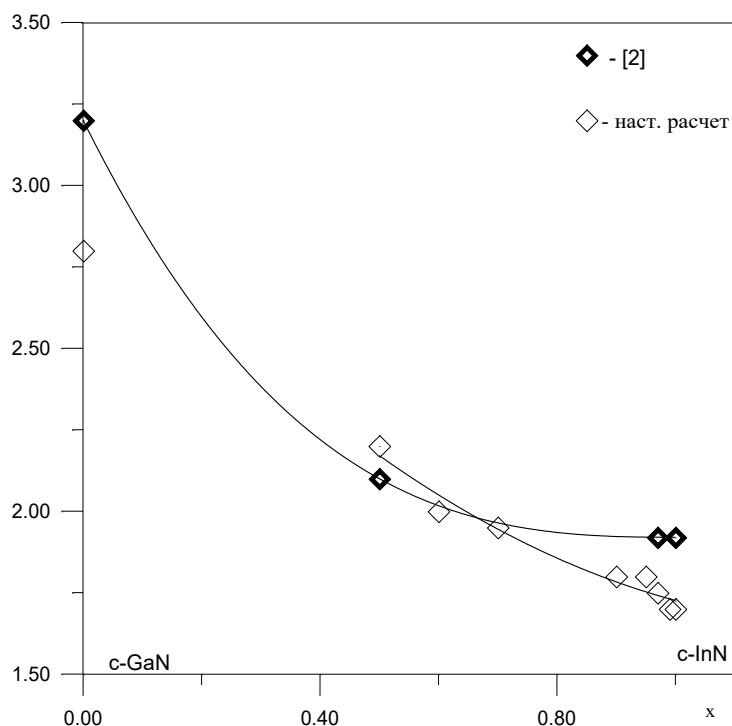


Fig. 4. Composition dependence curve $E_g(x)$ for alloys $\text{c-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$)

The form of the composition dependence curve $E_g(x)$ for alloys $\text{c-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$) is analogous of one found earlier [19] for the cubic alloys $\text{c-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and does not contradict usual notions of physics. The value of bowing parameter at indium fraction $x = 0,5$ is the greatest one and equals to 0.25 eV.

Interatomic interactions. Some particularities of the interatomic interaction in cubic alloys $\text{c-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ can be observed on the maps of total electron density (ED) in the real space. For example in Fig. 5 the maps of ED are demonstrated for $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ in the planes (110) and (001). One can see, that along the lines Ga-N and In-N the covalent type bonds prevail. The localization of ED for In-N bond is expressed explicitly that is the evidence of creation of hybridized orbitals $\text{In}4d\text{-N}2p$ and $\text{Ga}3d\text{-N}2p$. The interaction of atoms of metallic sublattice is metallic one, whereas the bonds Ga-In are of directing type and are formed by $\text{In}2p$ - and $\text{Ga}2p$ -states in the energy range from 6.5 to 11 eV.

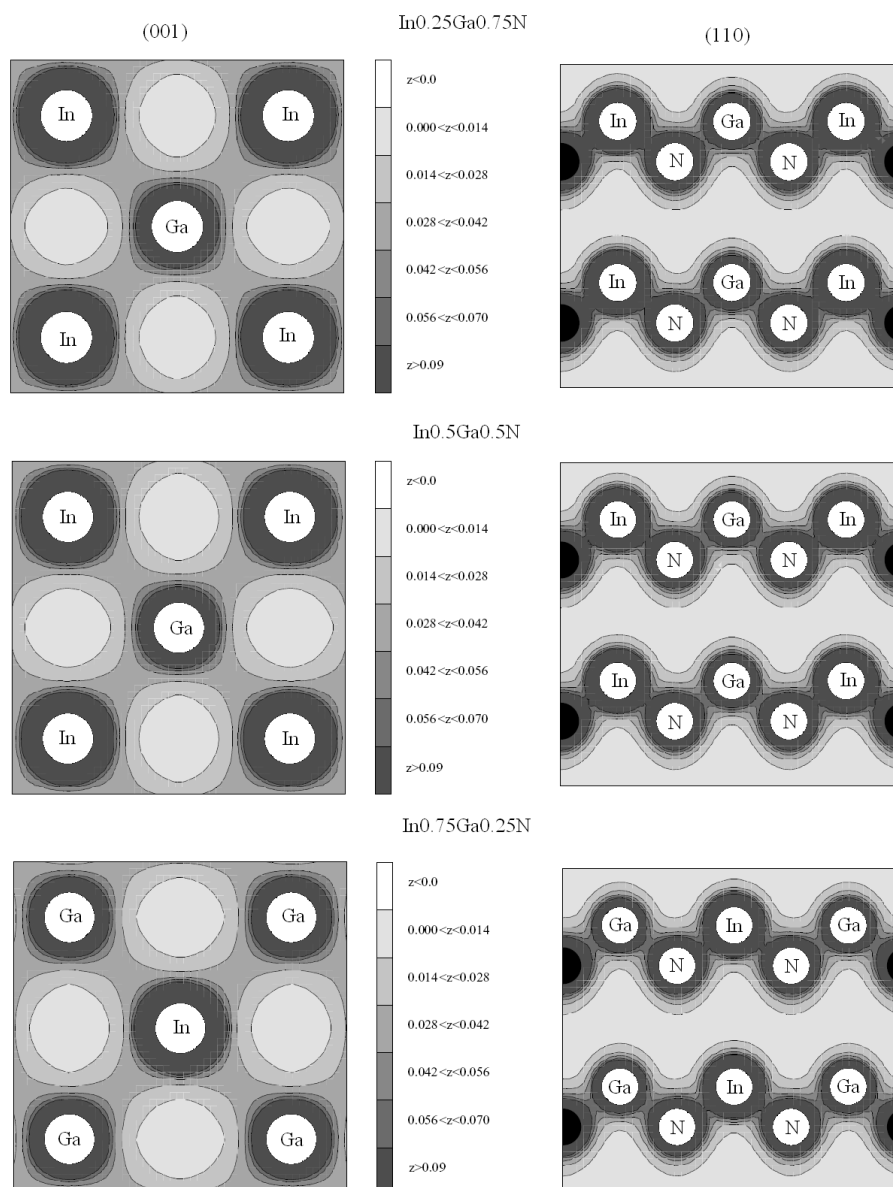


Fig. 5 – The total density maps in Ga-N and In-N (001) and (110) planes according to $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0,25; 0,5; 0,75$)

The analysis of electron energy spectra (Fig. 3a and 3b) which have the resonance character shows that the creation of localized hybridized orbitals $\text{In}5s\text{-N}2p$ and $\text{Ga}4s\text{-N}2p$ in the energy interval from 4 to 10 eV is possible.

Conclusion. With application of ab initio zone quantum-mechanical method using the density functional theory and with the cluster version of the local coherent potential approach the systematic calculations of electronic and magnetic properties of cubic alloys $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ for various molar fractions $0 \leq x \leq 1$ of indium were carried out.

In the row $\text{GaN} \rightarrow \text{In}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N} \rightarrow \text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N} \rightarrow \text{In}_{0,75}\text{Ga}_{0,25}\text{N}$ we have observed: the shift of VB to the higher energies by more than 1.0 eV, the decreasing of energy gap E_g , which equals for $\text{In}_{0,99}\text{Ga}_{0,01}\text{N} \approx 1,7$ eV, the appearance of acceptor levels above Fermi energy due to In and Ga atoms and resonance electron states of s - and p -symmetry in unoccupied band.

The results of our calculations of partial local electron densities of states for spin subsystems $N_\uparrow(E)$ and $N_\downarrow(E)$ permit us to assert the existence of the spin polarization effect of atoms In, Ga, and N in the system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, that transmits it into the state of magnetic semiconductor. The magnetic moments of atoms In, Ga, and N has been calculated as well as saturation magnetization of the system $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, which can be treated as the evidence of the paramagnetic state of this material. Thus, in cubic crystals $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ with the great fraction of indium the effect of spin splitting of zone $\text{Ga}4(s-, p-)$, $\text{In}5(s-, p-)$, and $\text{N}2p$ was observed which leads to creation of magnetic moments about $0.01\mu_B$ at atoms of both sublattices. At the same time these atomic magnetic moments In ($0,009\mu_B$), Ga ($0,009\mu_B$), and N ($-0,008\mu_B$) does not lead to ferromagnetism because the magnetic moments of atoms of two sublattices are antiparallel, which is in accordance with molecular theory of Weiss.

References

1. Nakamura, S. InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes. *Journal of Crystal Growth*, 1999, vol.202, pp. 290-295.
2. Ferhat, M., Bechstedt, F. First-principles calculations of gap bowing in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ alloys: Relation to structural and thermodynamic properties. *Physical Review B*, 2002, vol. 65, pp. 075213-1 -075213-8.
3. Li, J.B., et al. Cubic InGaN grown by MOCVD. *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*, 1999, vol. 4S1, G3.25.
4. Krivolapchuk, V.V., Lundin, V.V., Mezdrogina, M.M. The role of inserting electrical fields in the formation of the radiation of quantum wells InGaN/GaN. *Fizika Tverdogo Tela*, 2005, vol. 47, no. 7, pp. 1338-1342.
5. Ferhat, M., Furthmüller, J., Bechstedt, F. Gap bowing and Stokes shift in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys: First-principles studies. *Applied Physics Letters*, 2002, vol. 80, pp. 1394-1396.
6. Davydov, V.Yu., et al. Band gap of InN and In-rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys ($0.36 < x < 1$). *Physica Status Solidi (b)*, 2002, vol. 230, pp. R4-R6.
7. Soshnikov, I.P., et al. Peculiarities of formation of the radiation of quantum wells. MOCVD. *Fiz. Tech. Semicond.*, 2000, vol. 34, pp. 647-651.
8. Martinez-Criado, G., et al. Direct observation of Mn clusters in GaN by X-ray scanning microscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 43, pp. L695-L697.
9. Oestreich, M. Injecting Spin Into Electronics, *Nature*, www.nature.com. Macmillan Magazines Ltd, 1999, vol.402, pp.735-741.
10. Dietl, T., Ohno, H., Matsukura, F. Hole-mediated ferromagnetism in tetrahedrally coordinated semiconductors. *Physical Review B*, 2001, vol.63, pp. 195205.
11. Dhar, S., et al. Colossal Magnetic Moment of Gd in GaN. *Physical Review Lett.*, 2005, vol. 94, pp. 037205.
12. Shein, I.R., et al. Magnetization of beryllium oxide in the presence of non-magnetic impurities: Boron, carbon, and nitrogen. *JETP Lett.*, 2007, vol.85, iss. 5, pp. 246-250.
13. Baroni, S., Corso, A. Dal, de Gironcoli, S., et al. <http://www.pwscf.org/>.
14. Ilyasov, V.V., Zdanova, T.P., Nikiforov, I.Ya. X-ray spectra and electron energy structure of nitrogen into solid solution $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *Fizika Tverdogo Tela*, 2007, vol.49, pp.1369-1372.
15. Perdew, J.P., Burke, S., Ernzerhof, M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Physical Review Lett.*, 1996, vol. 77, p. 3865.
16. Ilyasov, V.V., Nikiforov, I.Ya., Ilyasov, Yu.V. Ti L-Spectrum XANES and electron structure of the system Ti-Al-C. *Journal Physical IV France*, 1997, vol.7, pp. 281-282.
17. Mecheryakov, V.F. Crystal field and the magnetization of inclined antiferromagnetic CoCO_3 . *JETP*, 2007, vol.132, pp.1138-1151.
18. Hermann, F., Skillman, S. Atomic structure calculations. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs (N.J.), 1963.
19. Ilyasov, V.V., Zdanova, T.P., Nikiforov, I.Ya. Electron energy structure and X-ray spectra of wide-gap semiconductors GaN, AlN, and AlN-GaN. *Journal of Structural Chemistry*, 2007, vol.48, pp.68-75.

Библиографический список

1. Nakamura, S. InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes / S. Nakamura // *Journal of Crystal Growth*. — 1999. — Vol. 202. — P. 290-295.
2. Ferhat, M. First-principles calculations of gap bowing in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ alloys: Relation to structural and thermodynamic properties / M. Ferhat, F. Bechstedt // *Physical Review B*. — 2002. — Vol. 65. — P. 075213-1 -075213-8.
3. Li, J.B., et al. Cubic InGaN grown by MOCVD / J.B. Li [et al.] // *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*. — 1999. — Vol. 4S1, G3. — P. 25.
4. Krivolapchuk, V.V. The role of inserting electrical fields in the formation of the radiation of quantum wells InGaN/GaN / V.V. Krivolapchuk, V.V. Lundin, M.M. Mezdrogina // *Fizika Tverdogo Tela*. — 2005. — Vol. 47, № 7. — P. 1338-1342.
5. Ferhat, M. Gap bowing and Stokes shift in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys: First-principles studies / M. Ferhat, J. Furthmüller, F. Bechstedt // *Applied Physics Letters*. — 2002. — Vol. 80. — P. 1394-1396.
6. Davydov, V.Yu. Band gap of InN and In-rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys ($0.36 < x < 1$) / V.Yu. Davydov [et al.] // *Physica Status Solidi (b)*. — 2002. — Vol. 230. — P. R4-R6.
7. Soshnikov, I.P., et al. Peculiarities of formation of the radiation of quantum wells. MOCVD / I.P. Soshnikov [et al.] // *Fiz. Tech. Semicond.* — 2000. — Vol. 34. — P. 647-651.

8. Martinez-Criado, G. Direct observation of Mn clusters in GaN by X-ray scanning microscopy / G. Martinez-Criado [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. — 2004. — Vol. 43. — P. L695-L697.
9. Oestreich, M. Injecting Spin Into Electronics / M. Oestreich // Nature, Macmillan Magazines Ltd. — 1999. — Vol.402. — P.735-741.
10. Dietl, T. Hole-mediated ferromagnetism in tetrahedrally coordinated semiconductors / T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura // Physical Review B. — 2001. — Vol. 63. — P. 195205.
11. Dhar, S. Colossal Magnetic Moment of Gd in GaN / S. Dhar [et al.] // Physical Review Lett. — 2005. — Vol. 94. — P. 037205.
12. Shein, I.R. Magnetization of beryllium oxide in the presence of non-magnetic impurities: Boron, carbon, and nitrogen. / I.R. Shein [et al.] // JETP Lett. — 2007. — Vol. 85, iss. 5. — P. 246-250.
13. Baroni, S. Phonons and related crystal properties from density-functional perturbation theory / S. Baroni, S. de Gironcoli, A. Dal Corso, P. Giannozzi // Reviews of Modern Physics. — 2001. — Vol. 72, iss. 2. — P. 515.
14. Ilyasov, V.V. X-ray spectra and electron energy structure of nitrogen into solid solution $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ / V.V. Ilyasov, T.P. Zdanova, T.Ya. Nikiforov // Fizika Tverdogo Tela. — 2007. — Vol.49. — P. 1369-1372.
15. Perdew, J.P. Generalized Gradient Approximation Made Simple / J.P. Perdew, S. Burke, M. Ernzerhof // Physical Review Lett. — 1996. — Vol. 77. — P. 3865.
16. Ilyasov, V.V. Ti L-Spectrum XANES and electron structure of the system Ti-Al-C / V.V. Ilyasov, I.Ya. Nikiforov, Yu.V. Ilyasov // Journal Physical IV France. — 1997. — Vol. 7. — P. 281-282.
17. Mecheryakov, V.F. Crystal field and the magnetization of inclined antiferromagnetic CoCO_3 / V.F. Mecheryakov // JETP. — 2007. — Vol. 132. — P. 1138-1151.
18. Hermann, F. Atomic structure calculations / F. Hermann, S. Skillman // Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs (N.J.). — 1963.
19. Ilyasov, V.V. Electron energy structure and X-ray spectra of wide-gap semiconductors GaN, AlN, and AlN-GaN / V.V. Ilyasov, T.P. Zdanova, I.Ya. Nikiforov // Journal of Structural Chemistry. — 2007. — Vol. 48. — P. 68-75.

Поступила в редакцию 07.12.2015

Сдана в редакцию 07.12.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.652

DOI 10.12737/19696

Технология раздельного формирования многомерных данных*

С. В. Зыкин¹, С. В. Мосин², А. Н. Полуянов^{3**}^{1, 2, 3}Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

Technology of separate generation of multidimensional data ***

S. V. Zykin¹, S. V. Mosin², A. N. Poluyanov^{3**}^{1, 2, 3}Sobolev Institute of Mathematics, Novosibirsk, Russian Federation

Предметом исследования является технология формирования многомерного представления данных с использованием раздельного задания размерностей и мер. Цель — обеспечение максимального уровня автоматизации работы пользователей при формировании новых кубов данных. В ходе проведенных изысканий решены следующие задачи: определена последовательность формирования промежуточных представлений данных; исследована корректность этих представлений; разработаны эффективные алгоритмы формирования представления и проверки корректности. Теоретической основой исследования являются методы межмодельных преобразований данных. При этом в качестве исходной модели данных используется классическая реляционная модель, в качестве целевой — расширенная модель многомерных данных с несбалансированными иерархиями в размерностях. В результате проведенной работы представлена технология формирования многомерных данных. Полученные результаты могут использоваться аналитическими службами различных предприятий в процессе обработки значительных объемов данных. Предложенная технология формирования многомерных данных является развитием традиционных OLAP-технологий.

Ключевые слова: гиперкуб, реляционная база данных, OLAP.

The research subject is the technology of generating the multivariable data representation with using separate formation of dimensions and measures. The purpose of the study is to provide a full level of the user's work automation at the formation of new data cubes. In the course of investigation, the following problems are solved: the sequence of generating intermediate data representations is determined; the correctness of these representations is studied; efficient algorithms for generating the representations and checking their correctness are developed. The theoretical basis is the methods of the inter model mapping. Herewith, a classical relational model is used as a source data model, an extended model of the multidimensional data with unbalanced hierarchies in dimensions — as a target one. The work result is the multidimensional data construction technology. Consequently, the results obtained can be used by the analytical departments at various enterprises in processing large data volumes. The proposed technology of the multidimensional data formation is the traditional OLAP-technologies development.

Keywords: hypercube, relational database, OLAP.

Введение. Исследование OLAP (online analytical processing — аналитическая обработка в реальном времени) предполагает рассмотрение свойств моделей гиперкубов [1–3] и операций их преобразования [2, 4] с целью анализа данных. Особое внимание уделяется построению иерархий в размерностях [2, 3, 5–7], что позволяет гарантировать корректность операций агрегации данных. В работах [3, 5, 7] рассматриваются нормальные формы для многомерных моделей данных, которые позволяют контролировать неопределенные значения (NULL) в иерархиях размерностей.

В большинстве работ предполагается, что кубическое представление данных должно быть постоянно хранимым и периодически обновляемым из операционной базы данных (MOLAP — многомерная OLAP) для минимального времени отклика системы на запросы пользователя. Другой подход заключается в динамическом формировании многомерных данных с преобразованием схемы исходной операционной базы данных в «звезду» или «снежинку» (ROLAP — реляционная OLAP). Общий недостаток этих двух подходов — регламентированность предполагаемых операций анализа данных.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: szykin@mail.ru, svmosin@gmail.com, andrey.poluyanov@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

В данной статье предполагается, что аналитическая работа пользователя основана на необходимости формирования новых гиперкубов из исходного реляционного представления данных.

Рассмотрим формализацию задачи. Пусть задана схема базы данных $\mathfrak{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, полученная в результате нормализации отношений [8, 9]. Отношения R_i определены на множестве атрибутов $U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$. Пусть $[R_i]$ — схема отношения, множество атрибутов, на которых определено отношение R_i . Предположим, что схема \mathfrak{R} является редуцированной [9], то есть не существует двух отношений таких, что $[R_i] \subseteq [R_j]$, при $i \neq j$. Кортж $t[X]$ — совокупность значений атрибутов $A_j \in X \subseteq [R_i]$, заданных в кортеже $t \in R_i$. Неопределенное значение $NULL$ атрибута A_j в кортеже t : $t[A_j] = NULL$ не равно любому другому значению, в том числе другому неопределенному значению.

Многомерное представление будем задавать в виде совокупности размерностей $\{D_1, D_2, \dots, D_d\}$, где D_l — множество расширенных имен атрибутов: $R_i A_j, A_{\varphi} \in [R_i]$; M — множество мер, также заданных в виде расширенных имен атрибутов. Значения D_l являются значениями координат гиперкуба, значения M будут располагаться в рабочей области гиперкуба. Для каждой размерности задается ограничение в виде логической формулы F_l .

В данной работе предлагается отказаться от необходимости выполнения функциональной зависимости [3, 5, 7, 10, 11]

$$D_1 D_2 \dots D_d \rightarrow M, \quad (1.1)$$

которая означает, что любому составному вектору значений размерностей $D_1 D_2 \dots D_d$ соответствует не более одного вектора значений мер M .

Отказ от зависимости (1.1) позволит использовать содержательные (не ключевые) атрибуты в размерностях и иметь в одной ячейке гиперкуба несколько значений (список) атрибута $R_i A_j \in M$. Списки значений используются в анализе данных, когда значения параметров не надо соотносить с объектами.

Пример 1. Рассмотрим фрагмент базы данных лечебного заведения. Задано множество атрибутов: A_1 — № пациента, A_2 — ФИО пациента, A_3 — № показателя, A_4 — показатель, A_5 — значение показателя, A_6 — № дня получения показателя, A_7 — группа пациентов. На предложенном множестве атрибутов существуют следующие зависимости: $DEP = \{A_1 \rightarrow A_2 A_7, A_3 \rightarrow A_4, A_1 A_3 A_6 \rightarrow A_5\}$. По правилам построения нормальных форм [8, 9] будет получена следующая схема базы данных:

- пациенты — $R_1(\underline{A_1}, A_2, A_7)$;
- перечень анализов — $R_2(\underline{A_3}, A_4)$;
- результаты анализов — $R_3(\underline{A_1}, \underline{A_3}, \underline{A_6}, A_5)$.

Одно из возможных представлений гиперкуба приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица анализов пациентов

Показатель	Креатинин		Белок		Билирубин	
Группа пациентов	2	3	2	3	2	3
№ дня получения показателя	Значение показателя					
1	61,97,78,101...	64,104,69,49...	82,70,67,69...	70,64,80,74...	14.2,17.8,18.84,44.3..	19.5,16.8,8.6,19.5..
2	63,102,83,113.	71,108,71,32...	64,58,68,61...	55,57,54,62...	34.7,15.4,96.5,64.9...	36.8,19.5,32.4,73.9

3	59,59,87,79...	71,110,75,51...	68,62,58,59...	55,65,70,65...	19.5,17.8,83.78,114.3	24.9,12.3,15.8,30.3
				

В табл. 1 атрибуты размерностей представлены жирным шрифтом, атрибуты мер — курсивом, значения атрибутов — обычным шрифтом.

Схема гиперкуба в табл. 1 может быть представлена в следующем виде:

$$\{R_3 A_6\} \times \{R_2 A_4 \{R_1 A_7 (R_3 A_5)\}\}, \quad (1.2)$$

где $D_1 = \{R_3 A_6\}$ и $D_2 = \{R_2 A_4, R_1 A_7\}$ — размерности; $M = \{R_3 A_5\}$ — мера.

Логическое ограничение:

$$F = (R_2 A_4 = \text{'Креатинин'} \vee R_2 A_4 = \text{'Белок'} \vee R_2 A_4 = \text{'Билирубин'}) \wedge (R_1 A_7 = 2 \vee R_1 A_7 = 3).$$

При формировании представлений в примере использовались так называемые контексты и таблица соединения, определение и способ формирования которых рассматриваются далее.

2. Технология формирования многомерных данных. Для автоматизации построения представления многомерных данных используется следующая детализация последовательности их формирования, предложенная в работе [11].

1. Из списка атрибутов БД пользователь формирует множества атрибутов размерностей D_1, D_2, \dots, D_d и меры M . Естественными являются ограничения: $D_i \cap D_j = \emptyset, i \neq j, D_i \cap M = \emptyset, i, j = 1, 2, \dots, d$.
2. Формирование иерархий размерностей для множеств атрибутов D_1, D_2, \dots, D_d . Иерархии формируются автоматически по правилам, рассмотренным в работе [12], и при желании пользователь может их модифицировать.
3. По шаблону, соответствующему дизъюнктивной нормальной форме, задаются логические ограничения на размерности F_1, F_2, \dots, F_d , где логическая формула F_i задана на атрибутах размерности D_i .
4. Формирование контекстов размерностей C_1, C_2, \dots, C_d (некоторые контексты могут быть пустыми, а некоторые — псевдоконтекстами). Далее будут представлены соответствующие определения.
5. Формирование контекста приложения C_0 и соответствующей реализации в виде таблицы соединений TJ_0 .
6. Формирование реализаций размерностей TJ_1, TJ_2, \dots, TJ_d с сортировкой значений в соответствии с иерархией. Если контекст размерности не пуст, то он используется для формирования TJ_i , в противном случае реализация размерности является проекцией TJ_0 .
7. Формирование реализации (представления) многомерной таблицы (заполнение значений мер на соответствующих местах таблицы). Если в одной ячейке рабочей области гиперкуба значений несколько, то они перечисляются через запятую.

Пользователь вручную выполняет шаги 1 и 3 и осуществляет выбор предложенных вариантов в шагах 2, 4 и 5. Все остальные операции выполняются автоматически.

3. Контексты

3.1. Свойства контекстов. Пусть DEP — множество зависимостей (функциональных, многозначных, включения, соединения), определенных на множестве атрибутов U и множестве отношений \mathfrak{R} . Пусть R — отношение, определенное на множестве атрибутов U (универсальное реляционное отношение). В работе используются классические определения зависимостей: функциональных, многозначных, зависимостей соединения, реализованных зависимостей [8, 9], зависимостей включения [13, 14, 15].

Пусть $C = \{R_1, R_2, \dots, R_q\}$ — произвольное подмножество отношений реляционной БД.

Определение 3.1. Множество C будем называть контекстом, если оно удовлетворяет свойству соединения без потери информации (СБПИ) на зависимостях DEP , реализованных в C .

Замечание. В основе контекста лежит операция естественного соединения, которая собирает из различных отношений БД связанные друг с другом по значению данные.

Алгоритм проверки свойства СБПИ [8] является полиномиальным, но все равно довольно затратным по времени и по памяти для больших схем БД. Рассмотрим вспомогательные свойства, которые позволят улучшить эти характеристики.

Теорема 3.1. Множество отношений C обладает свойством СБПИ, если существует отношение $R_i \in C$, замыкание первичного ключа которого совпадает со всем множеством атрибутов отношений множества C .

Пусть $C_m = \{R_1, R_2, \dots, R_q\}$ — произвольное множество отношений и $[C_m] = [R_1] \cup [R_2] \cup \dots \cup [R_q]$.

Теорема 3.2. Множество отношений $C_{m+1} = \{R_1, R_2, \dots, R_q, R_{q+1}\}$ не обладает свойством СБПИ на DEP , если зависимость $Z \rightarrow X(Y)$ не выводима из DEP , где $X \subseteq [C_m]$, $Y \subseteq [R_{q+1}]$ и $[C_m] \cap [R_{q+1}] \subseteq Z$.

Определение 3.2 (существующее соединение). Выражение $R_1 \bowtie R_2 \bowtie \dots \bowtie R_q$ будем называть существующим соединением, если для совокупности отношений $R_i, i = 1, \dots, q$, существует хотя бы одна перестановка V_1, V_2, \dots, V_q отношений R_1, R_2, \dots, R_q такая, что

$$([V_1] \cup [V_2] \cup \dots \cup [V_j]) \cap [V_{j+1}] \neq \emptyset, j = 1, \dots, q-1.$$

Теорема 3.3. Если множество отношений $C = \{R_1, R_2, \dots, R_q\}$ не образует существующее соединение, то оно не обладает свойством СБПИ на множестве функциональных зависимостей FD .

Проверки условий, предложенных в теоремах 3.1–3.3, являются менее затратными по памяти и по времени, чем проверка свойства СБПИ по алгоритму [8]. Осталось разобраться со сложностью алгоритма проверки свойства существующего соединения.

Вход: множество отношений $C = \{R_{mas[1]}, R_{mas[2]}, \dots, R_{mas[p]}\}$, mas — массив с номерами отношений, для которых осуществляется проверка существования соединения. Считаем, что элементы массива нумеруются с 1, p — число элементов массива.

Выход: $flag_exist = 1$ — если соединение существует, $flag_exist = 0$ — если соединение не существует.

Теорема 3.4. На выходе алгоритма (рис. 1) $flag_exist = 1$ тогда и только тогда, когда множество отношений $C = \{R_{mas[1]}, R_{mas[2]}, \dots, R_{mas[p]}\}$ образует существующее соединение.

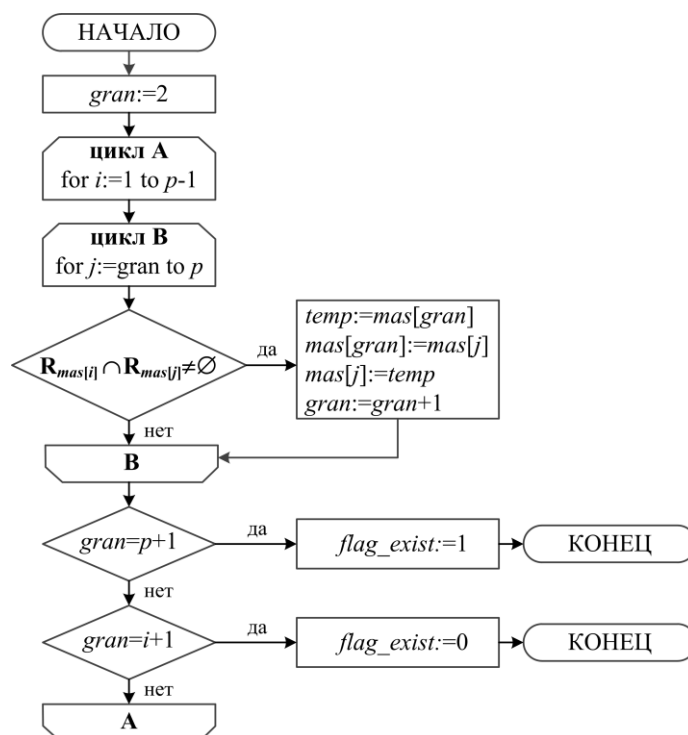


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проверки существования соединения

С формальной точки зрения разработанный алгоритм является аналогом алгоритма поиска в ширину на графах [16]. Отличие в том, что на вход рассмотренного алгоритма подается не полностью построенный граф, а только его вершины, при работе алгоритма строятся только те ребра, которые необходимы для проверки свойства существования соединения отношений.

Анализ рассмотренного алгоритма показал, что самая трудоемкая операция — проверка пересечений. Она в алгоритме выполняется $p(p-1)/2$ раз. Аналогичные по сложности операции при проверке свойства СБПИ выполняются примерно $np(1+p)$ раз, где n — общее количество атрибутов в схеме базы данных. При этом учитывалось, что минимальное покрытие множества функциональных зависимостей [8] по мощности примерно равно количеству отношений. При проверке свойства СБПИ могут использоваться многозначные зависимости и зависимости соединений. Поскольку n не менее чем на порядок больше p и примерно 70 процентов комбинаций отношений на схеме БД не образуют существующее соединение, то применение рассмотренного алгоритма перед проверкой свойства СБПИ дает существенный выигрыш в результирующем количестве операций.

3.2. Формирование контекстов. Первоначальный выбор размерностей и мер гиперкуба предлагается сделать в расширенном виде: $R_i A_j$, где R_i — наименование отношения из исходной реляционной БД, A_j — наименование атрибута в этом отношении. Таким образом будет задано начальное множество отношений $C^0 = \{R^0_1, R^0_2, \dots, R^0_q\}$, участвующее в обязательном порядке сначала в формировании таблицы соединения, а потом — гиперкуба.

Совокупность отношений, по которым строится гиперкуб, должна удовлетворять свойству СБПИ [17], поскольку лишние кортежи в промежуточном представлении данных дают лишние значения в рабочей области гиперкуба. Следовательно, дальнейшая задача состоит в дополнении множества C^0 отношениями из \mathcal{R} , чтобы результирующее множество отношений удовлетворяло свойству СБПИ на множестве зависимостей, то есть являлось контекстом. В общем случае таких вариантов дополнения существует несколько. В работе [11] установлены критерии, позволяющие сделать перебор отношений направленным.

— Замыкание первичного ключа нового отношения R_i совпадает со всем множеством атрибутов в выбранных отношениях. Дополнение этого отношения к C^0 гарантирует выполнение свойства СБПИ по теореме 3.1. Такое отношение получает приоритет 3.

— Для отношения R_i выполнено условие существования связи, соответствующей $R_i[X] \subseteq R_j[X]$ с уже выбранными отношениями R_j , где множество атрибутов X является первичным ключом отношения R_j . Такое отношение получает приоритет 2, поскольку высока вероятность выполнения свойства СБПИ для результирующего множества отношений.

— Если дополняемое отношение R_i не удовлетворяет условиям теорем 3.2 и 3.3, то такое отношение получает приоритет 1. Остальные отношения получают приоритет 0.

— Формируемый контекст не должен содержать лишних отношений, наличие которых обусловлено только порядком присоединения отношений к контексту в алгоритме.

Перечисленные критерии увеличивают вероятность более быстрого достижения результата.

Введем обозначения. Пусть $C^1 = \{R_1^1, R_2^1, \dots, R_p^1\}$ — множество отношений, не входящих в исходное множество $R^0: R^1 = \mathfrak{R} \setminus R^0$. U^0 — множество атрибутов, на котором определены отношения из $R^0: U^0 = [R_1^0] \cup [R_2^0] \cup \dots \cup [R_q^0]$. DEP^0 — множество зависимостей, реализованных на отношениях из R^0 .

В работе [11] рассмотрен алгоритм формирования контекстов, основанный на последовательном формировании сочетаний отношений и проверке их на свойство СБПИ.

Далее контекст приложения будем обозначать C_0 .

В примере 1 встречаются ячейки с несколькими значениями (списком). Возникает закономерный вопрос: если в одном списке присутствуют два и более совпадающих значения, то дублируют ли они друг друга. Ответ следующий: если эти значения соответствуют одному и тому же объекту и одному и тому же параметру, то это дублирование. В результирующем представлении гиперкуба GC идентификаторы объектов отсутствуют, однако они есть в промежуточном представлении данных — таблице соединений TJ . Для того чтобы в дальнейшем иметь возможность определять дублированные значения, введем понятие ключа меры.

Определение 3.3. Множество атрибутов KM_j будем называть ключом атрибута меры $R_i A_j \in M$ в таблице соединений TJ . Если $KM_j \subseteq [TJ]$, зависимость $KM_j \rightarrow R_i A_j$ выводима на множестве функциональных зависимостей, и не существует выводимой зависимости $Y \rightarrow R_i A_j$, где $Y \subset KM_j$. Пусть $KM = KM_1 \cup KM_2 \cup \dots \cup KM_h$, где $h = |M|$ — общий ключ для всех мер гиперкуба.

После того как сформирована схема GC с установлением иерархий в размерностях и присоединением мер к атрибутам одной из размерностей (в примере 1 меры присоединены к вертикальным размерностям), простейшим решением задачи формирования гиперкуба по контексту приложения $C_0 = \{R_1', R_2', \dots, R_p'\}$ при $F = \emptyset$ является выполнение операции естественного соединения отношений для формирования промежуточного представления TJ :

$$TJ = R_1' [V_1] \bowtie R_2' [V_2] \bowtie \dots \bowtie R_p' [V_p]. \quad (3.1)$$

Здесь p — количество отношений в контексте приложения; V_i — множество атрибутов $A_j \in [R_i']$, для которых: либо существует размерность D_l — такая, что $R_i' A_j \in D_l$, либо $R_i' A_j \in M$, либо $R_i' A_j \in KM$, либо существует $R_v' \in C_0$ — такое, что $A_j \in [R_v']$ и $i \neq v$, либо существует логическая формула F_l и $A_j \in [F_l]$.

Для преобразования в гиперкуб значения размерностей формируются в виде проекций по соответствующим атрибутам: $TJ[D_l]$ с необходимой сортировкой кортежей каждой размерности в соответствии с иерархией.

Завершается построение GC присваиванием значений мер M в рабочей области GC : для каждого кортежа $t \in TJ$ на пересечении значений координат $t[D_l]$, $l = 1, \dots, d$ ставится значение $t[A_j]$, $R_i' A_j \in M$. Во всех остальных ячейках GC ставится значение $NULL$. Проблема дублированных значений в ячейках гиперкуба и остальные детали реализации технологии будут рассмотрены далее.

Предложенная процедура формирования GC [11] не решает следующие проблемы.

— Если какому-либо набору значений размерности не соответствует ни одно значение меры, то эти значения размерностей не появятся в реализации гиперкуба (по свойству операции естественного соединения). Однако отсутствие значений мер также является предметом анализа данных.

— Ограничения на значения размерностей могут быть заданы опосредованно — через значения на связанные кортежи в отношениях, которые не входят в контекст приложения. Тогда эти отношения должны образовывать отдельный контекст с отношениями для размерностей.

— Для некоторых размерностей необходимо иметь Декартово произведение исходных отношений (все возможные комбинации атрибутов одной размерности). Тогда эти отношения не должны дополняться другими отношениями для получения контекста.

— Если значения атрибутов, по которым выполняется соединение отношений в формуле (3.1), не определены в некоторых кортежах БД, то эти кортежи будут отсутствовать в TJ , а вместе с ними значения мер и размерностей из этих кортежей. Если соединить меньшее количество отношений контекста, то значения мер и размерностей появятся в реализации TJ . Такие кортежи будем называть остатком соединения. Пользователь должен иметь возможность управления остатками.

4. Формирование гиперкубического представления

4.1. Реализация контекста. В качестве реализации контекста будем использовать представление данных в виде таблицы соединений, являющейся модификацией представления данных [18]. Совокупность свойств этой таблицы, которые будут рассмотрены ниже, позволяет получить необходимое представление для формирования многомерных представлений данных.

Рассмотрим преобразование представления реляционной БД: $\mathfrak{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ в таблицу соединений TJ со схемой (S, g) , где S — схема, определенная на множестве атрибутов $U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$; g — вектор вхождения кортежей отношений длины k .

Определим принцип формирования кортежей $t \in s$, где s — реализация (множество кортежей) таблицы TJ .

Рассмотрим все возможные сочетания без повторений отношений R_1, R_2, \dots, R_k , удовлетворяющие свойству СБПИ. Пусть множество отношений $C' = \{R_{mas(1)}, R_{mas(2)}, \dots, R_{mas(p)}\}$ — контекст, где mas — целочисленный массив из p номеров отношений текущего сочетания: c' — его реализация, ограниченная операцией селекции σ_F с логической формулой F :

$$c' = \sigma_F(R_{mas(1)}[W_{mas(1)}] \bowtie R_{mas(2)}[W_{mas(2)}] \bowtie \dots \bowtie R_{mas(p)}[W_{mas(p)}]), \quad (4.1)$$

где $V_{mas(i)} \subseteq W_{mas(i)}$, $i = 1, 2, \dots, p$, $V_{mas(i)}$ определены по формуле (3.1).

Для каждого кортежа $u \in c'$ формируем кортеж t по следующим правилам: $t[A_j] = u[A_j]$, если атрибут A_j принадлежит хотя бы одному отношению соединения, и $t[A_j] = emp$ в противном случае, где emp — пустое значение.

Каждому кортежу поставим в соответствие битовый вектор $g(t) = (g_1(t), g_2(t), \dots, g_k(t))$, где $g_j(t) = 1$, если отношение R_j участвует в текущем соединении, и $g_j(t) = 0$ в противном случае.

Рассмотрим отношение частичного порядка над кортежами $t \in s$ [10].

Определение 4.1. Кортеж $t \in s$ является менее определенным или равным кортежу $t' \in s$, когда для любого атрибута A_j выполнено условие: если $t[A_j] \neq t'[A_j]$, то $t[A_j] = emp$ и $g_j(t) \geq g_j(t')$, $j = 1, \dots, k$, причем $t[A_j] = t'[A_j]$, если A_j принимает значение $NULL$ в обоих кортежах. В этом случае будем писать $t < t'$, назовем кортеж t подчиненным кортежу t' и оба этих кортежа будем считать сравнимыми.

В представлении s достаточно хранить только кортеж t' , который содержит в себе все менее определенные либо равные кортежи. Следовательно, следующим этапом построения представления s является удаление в нем всех подчиненных кортежей. Равенство неопределенных значений в определении 4.1 позволяет избавиться от подчиненных кортежей t , которые получены из тех же кортежей БД, что и t' . Отличие значений $NULL$ и emp в том, что первое указывает на неопределенное значение атрибута, а второе — на отсутствие соответствующего кортежа в текущем соединении. Очевидно, что отношение $<$ является транзитивным.

Заключительным этапом построения представления s является удаление в нем кортежей, для которых $F(t) = FALSE$. При этом кортежи t' , для которых $t' < t$ и $F(t') = TRUE$, считаются лишними, поскольку неопределенные данные в t' доопределяются в t и пользователь от них отказался.

Определение 4.2. Проекция $\pi_{R(L)}(s)$ есть совокупность кортежей $u[R(L)]$, определенных на множестве всех атрибутов отношений $R(L)$, где для каждого $u[R(L)]$ существует кортеж $t \in s$ — такой, что $u[R(L)] = t[R(L)]$ и $g_{mas(i)}(t) = 1$, $i = 1, 2, \dots, p$.

Логическое ограничение $F(t)$ для каждой размерности будем представлять в виде дизъюнктивной нормальной формы:

$$F = F_1 \vee F_2 \vee \dots \vee F_m.$$

Здесь каждая формула F_i является конъюнктом:

$$F_i = F_{i,1} \wedge F_{i,2} \wedge \dots \wedge F_{i,q_i},$$

где $F_{i,j}$ — предикат сравнения языка SQL .

Если какой-либо предикат $F_{i,j}$ не определен на кортеже t , то он аннулируется — заменяется значением $TRUE$, если в этом конъюнкте еще есть не аннулированные предикаты, в противном случае — $FALSE$. Такая подстановка позволяет оставить в s кортежи, для которых пока не определены некоторые атрибуты или отсутствуют связанные по значениям кортежи в других отношениях, что также является предметом анализа информации. Формула F после подстановки будет принимать только два значения: $TRUE$ и $FALSE$.

4.2. Реализация гиперкубического представления. Под реализацией представления гиперкуба будем понимать множество таблиц соединения s_i и таблиц, сформированных по псевдоконтекстам. Далее эти таблицы будем называть исходными. Это соответствует поликубическому представлению данных (кубоидам). Представления, необходимые для анализа данных, могут быть получены:

- непосредственно из исходных таблиц,
- с использованием рассмотренных операций проекции по атрибутам [8, 9] и проекции по контексту в соответствии с определением 4.2,
- с использованием определения дополнительных операций.

Рассмотрим применение таблиц для формирования результирующего представления данных GC , используемого при проведении различных видов многомерного анализа. Совокупность таблиц данных — T_i , $i = 0, 1, 2, \dots, d$, определенных на множествах атрибутов размерностей D_i соответственно. Таблица T_0 соответствует контексту приложения и определена на множестве атрибутов $D_0 = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_d \cup M$. При этом

$$T_0 = s_0[D_0], \quad (4.2)$$

где s_0 — таблица соединения для контекста приложения C_0 ; таблица T_0 содержит остатки соединения и значения мер,

Для формирования каждой размерности ($1 \leq i \leq d$) в зависимости от потребностей пользователя используется одна из трех следующих формул:

$$T_i = s_i[D_i], \quad (4.3)$$

где s_i — таблица соединения для контекста C_i ; таблица T_i содержит остатки соединения.

$$T_i = \pi_{R \cdot (L)}(s_0)[D_i], \quad (4.4)$$

где $C_i = \{R_1^*, R_2^*, \dots, R_q^*\}$ — пустой контекст; L — вектор номеров отношений пустого контекста; таблица T_i не содержит остатков соединения.

$$T_i = \sigma_{F_i}(R'_1[W_1] \bowtie R'_2[W_2] \bowtie \dots \bowtie R'_p[W_p])[D_i], \quad (4.5)$$

если $C_i = \{R'_1, R'_2, \dots, R'_p\}$ — псевдоконтекст, $0 < i \leq d$, F_i — логическое ограничение на кортежи, остальные обозначения и ограничения совпадают с формулой (3.1), таблица T_i не содержит остатков соединения.

Вывод. Предложенная модель многомерных данных является обобщением известных моделей, прежде всего за счет снятия ограничения (1.1). Технология ориентирована на работу аналитика, где не требуется быстрая (за доли секунд) реакция системы на запросы, поскольку в большинстве случаев аналитик должен вдумчиво выполнить различные виды анализа над различными представлениями.

Методологическая основа данного исследования может быть представлена следующим образом: операционная база данных должна удовлетворять принципам независимости, неизбыточности, непротиворечивости и т. д. Эта база данных является ядром приложений для множества пользователей, а не только отдельно взятого аналитика.

Библиографический список

1. Vassiliadis, P. A survey of logical models for OLAP databases / P. Vassiliadis, T. Sellis // SIGMOD Record. — 1999. — Vol. 28, № 4. — P. 64–69.
2. Pedersen, T.-B. A foundation for capturing and querying complex multidimensional data / T.-B. Pedersen, C.-S. Jensen, C.-E. Dyreson // Information Systems Frontiers. — 2001. — Vol. 26, № 5. — P. 383–423.
3. Lechtenborger, J. Multidimensional normal forms for data warehouse design / J. Lechtenborger, G. Vossen // Information Systems Frontiers. — 2003. — Vol. 28, № 5. — P. 415–434.
4. Progressive ranking of range aggregates / H.-G. Li [et al.] // Data & Knowledge Engineering. — 2007. — Vol. 63, № 1. — P. 4–25.
5. Lehner, W. Normal forms for multidimensional databases / W. Lehner, J. Albrecht, H. Wedekind // Proceedings of the Tenth International Conference on Scientific and Statistical Database Management. — Los Alamitos, 1998. — P. 63–72.
6. Giorgini, P. Goal-oriented requirement analysis for data warehouse design / P. Giorgini, S. Rizzi, M. Garzetti // In Proceedings of the 8th ACM international Workshop on Data Warehousing and OLAP: DOLAP '05. — Bremen, 2005. — P. 47–56.
7. Mazon, J. Reconciling requirement-driven data warehouses with data sources via multidimensional normal forms / J. Mazon, J. Trujillo, J. Lechtenborger // Data & Knowledge Engineering. — 2007. — Vol. 63, № 3. — P. 725–751.
8. Ullman, J. Principles of database systems / J. Ullman. — Stanford : Computer Science Press, 1980. — 379 p.
9. Maier, D. The theory of relational databases / D. Maier. — Rockville : Computer Science Press, 1983. — 637 p.
10. Zykin, S. V. Formation of Hypercube Representation of Relational Database / S. V. Zykin // Programming and Computer Software. — 2006. — Vol. 32, № 6. — P. 348–354.
11. Зыкин, С. В. Динамические контексты базы данных реляционного типа / С. В. Зыкин // Информатика и ее применения. — 2014. — Т. 8, № 1. — С. 77–88.
12. Редреев, П. Г. Построение иерархий в многомерных моделях данных / П. Г. Редреев // Известия Саратовского университета. — 2009. — Т. 9, № 4, ч. 1. — С. 84–87. — (Математика. Механика. Информатика).
13. Casanova, M. Inclusion Dependencies and Their Interaction with Functional Dependencies / M. Casanova, R. Fagin, C. Papadimitriou // Journal of Computer and System Sciences. — 1984. — № 28 (1). — P. 29–59.
14. Missaoui, R. The Implication Problem for Inclusion Dependencies: A Graph Approach / R. Missaoui, R. Godin // SIGMOD Record. — 1990. — Vol. 19, № 1. — P. 36–40.
15. Levene, M. Justification for Inclusion Dependency Normal Form / M. Levene, M.-W. Vincent // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. — 2000. — Vol. 12, № 2. — P. 281–291.
16. Aho, A.-V. Data Structures and Algorithms / A.-V. Aho, J.-E. Hopcroft, J.-D. Ullman. — Reading : Addison-Wesley, 1983. — 427 p.
17. Miller, L. Data Warehouse Modeler: A CASE Tool for Warehouse Design / L. Miller, S. Nila // Thirty-First Annual Hawaii International Conference on System Sciences. — 1998. — Vol. 6. — P. 42–48.

18. Zykin, S. V. Automation of the interface formation between multidimensional and relational representation of the data / S. V. Zykin // *Relational Databases and Open Source Software Development* / Ed. J.-R. Taylor. — New York : Nova Science Publishers, 2010. — Chapter 2. — P. 43–66.

References

1. Vassiliadis, P., Sellis, T. A survey of logical models for OLAP databases. *SIGMOD Record*, 1999, vol. 28, no.4, pp. 64–69.
2. Pedersen, T.-B., Jensen, C.-S., Dyreson, C.-E. A foundation for capturing and querying complex multidimensional data. *Information Systems Frontiers*, 2001, vol. 26, no. 5, pp. 383–423.
3. Lechtenborger, J., Vossen, G. Multidimensional normal forms for data warehouse design. *Information Systems Frontiers*, 2003, vol. 28, no. 5, pp. 415–434.
4. Li, H.-G., et al. Progressive ranking of range aggregates. *Data & Knowledge Engineering*, 2007, vol. 63, no. 1, pp. 4–25.
5. Lehner, W., Albrecht, J., Wedekind H. Normal forms for multidimensional databases. *Proceedings of the Tenth International Conference on Scientific and Statistical Database Management*. Los Alamitos, 1998, pp. 63–72.
6. Giorgini, P., Rizzi, S., Garzetti, M. Goal-oriented requirement analysis for data warehouse design. In *Proceedings of the 8th ACM international Workshop on Data Warehousing and OLAP: DOLAP '05*. — Bremen, 2005. — P. 47–56.
7. Mazon, J., Trujillo, J., Lechtenborger, J. Reconciling requirement-driven data warehouses with data sources via multidimensional normal forms. *Data & Knowledge Engineering*, 2007, vol. 63, no. 3, pp. 725–751.
8. Ullman, J. *Principles of database systems*. Stanford: Computer Science Press, 1980, 379 p.
9. Maier, D. *The theory of relational databases*. Rockville: Computer Science Press, 1983, 637 p.
10. Zykin, S.V. Formation of Hypercube Representation of Relational Database. *Programming and Computer Software*, 2006, vol. 32, no. 6, pp. 348–354.
11. Zykin, S.V. Dinamicheskie konteksty bazy dannykh relyatsionnogo tipa. [Dynamic contexts of relational-type database.] *Informatics and Applications*, 2014, vol. 8, no. 1, pp. 77–88 (in Russian).
12. Redreev, P.G. Postroenie ierarkhiy v mnogomernykh modelyakh dannykh. [Construction of hierarchies in multidimensional data models.] *Izvestiya of Saratov University. Series Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2009, vol. 9, no. 4, part 1, pp. 84–87 (in Russian).
13. Casanova, M., Fagin, R., Papadimitriou, C. Inclusion Dependencies and Their Interaction with Functional Dependencies. *Journal of Computer and System Sciences*, 1984, no. 28 (1), pp. 29–59.
14. Missaoui, R., Godin, R. The Implication Problem for Inclusion Dependencies: A Graph Approach. *SIGMOD Record*, 1990, vol. 19, no. 1, pp. 36–40.
15. Levene, M., Vincent, M.-W. Justification for Inclusion Dependency Normal Form. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2000, vol. 12, no. 2, pp. 281–291.
16. Aho, A.-V., Hopcroft, J.-E., Ullman, J.-D. *Data Structures and Algorithms*. Reading: Addison-Wesley, 1983, 427 p.
17. Miller, L., Nila, S. Data Warehouse Modeler: A CASE Tool for Warehouse Design. *Thirty-First Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 1998, vol. 6, pp. 42–48.
18. Zykin, S.V. Automation of the interface formation between multidimensional and relational representation of the data. Taylor, J.-R., ed. *Relational Databases and Open Source Software Development*. New York: Nova Science Publishers, 2010, Chapter 2, pp. 43–66.

Поступила в редакцию 03.11.2015

Сдана в редакцию 03.11.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.87:004

DOI 10.12737/19695

Возможности использования элитных особей при решении задачи коммивояжера моделью Гольдберга*

В. Г. Кобак¹, И. Ш. Рудова^{2**}^{1,2} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Applicability of elite samples in solving the traveling salesman problem by Goldberg model***

V. G. Kobak¹, I. S. Rudova^{2**}^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование актуальной задачи коммивояжера, которая является NP сложной задачей дискретной оптимизации. Показано, что для достижения поставленной цели пригодны лишь эвристические методы. Для решения задачи представлен результат совместного использования муравьиного (МА) и генетического (ГА) алгоритмов. Особенностью предложенного генетического алгоритма является то, что задача решается только с помощью различных мутаций (без кроссовера). Исследуемый ГА был улучшен введением элитарной стратегии. Испытания проводились на графах средней и большой размерности. Элитная особь, получаемая с помощью муравьиного алгоритма, в среднем улучшалась на 11 %. Показано, что эффективность генетического алгоритма напрямую зависит от количества особей в популяции и количества итераций алгоритма. Ввод элитарной стратегии улучшил получаемые значения целевой функции более чем в 2 раза. Увеличение числа запусков МА при выборе элиты позволило повысить эффективность алгоритма приблизительно на 2 %.

Ключевые слова: задача коммивояжера, генетический алгоритм, граф, модель Гольдберга, мутация, кроссовер, муравьиный алгоритм, элитная особь, феромон, природные вычисления.

The work objective is to study a critical traveling salesman problem which is NP complicated task of the discrete optimization. It is shown that only heuristics is appropriate in achieving this goal. The result of the ant colony algorithm (ACA) and genetic algorithm (GA) sharing is presented for the problem solution. The point is that the problem is solved using only mutations of various types (without crossover). The investigated GA is improved by the elitist strategy. The testing is done on graphs of the middle and large dimension. An “elite” sample obtained by the ACA is improved by a mean of 11%. It is shown that the efficiency of the genetic algorithm depends directly on the number of ants in the generation, and on the number of algorithm iterations. Target function values are improved more than twofold after the introduction of the elitist strategy. Increasing the number of ACA runs raises the efficiency of the algorithm by approximately 2%.

Keywords: traveling salesman problem, genetic algorithm, graph, Goldberg model, mutation, crossover, ant colony algorithm, elite sample, pheromone, natural computing.

Введение. Задача коммивояжера (ЗК) является NP сложной задачей дискретной оптимизации и определяется следующим образом: для заданного полного взвешенного графа $G = (V, E, D)$ с множеством вершин $V = \{v_i\}_n$, множеством ребер E и матрицей весов $D = \{d_{ij}\}_{n \times n}$ необходимо найти Гамильтонов цикл $(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_n})$, где (i_1, \dots, i_n) — перестановка на множестве $\{1, 2, \dots, n\}$, а $v_i \in V$, с минимальной суммой весов дуг [1]:

$$\sum_{j=1}^{n-1} d_{i_j i_{j+1}} + d_{i_n i_1} \rightarrow \min$$

Вершины графа G часто называются городами, а любой Гамильтонов цикл называется маршрутом коммивоя-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: valera33305@mail.ru, irmuse4ka@rambler.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

жера. Очевидным решением задачи является метод полного перебора. Выйдя из первого города, коммивояжер может направиться в один из $(n - 1)$ городов, откуда в $(n - 2)$ оставшихся городов и т. д., пока не останется один-единственный город, откуда он вышел. Таким образом, общее число маршрутов, подлежащих просмотру, составляет $(n - 1) \cdot (n - 2) \dots 2 \cdot 1 = (n - 1)!$ всевозможных вариантов. С увеличением количества городов это значение быстро возрастает и уже при 15 городах достигает астрономических цифр. Поиск точных и приближенных способов решения задачи о коммивояжере остается актуальным и с теоретической, и с практической точки зрения, так как не найдено, а возможно, и не существует точных алгоритмов, решающих 3К за короткое (полиномиальное) время. Поэтому для решения задачи коммивояжера эффективнее использовать не точные, а эвристические методы. Применение эвристических алгоритмов к какой-либо практической задаче обычно позволяет сформулировать рекомендации, которые намного лучше произвольного решения и которые наиболее близки к лучшему варианту.

Обзор алгоритмов решения. В данной статье решение задачи коммивояжера произведено модифицированным генетическим алгоритмом (ГА) с элитной особью. Начальное значение элиты получается при использовании n итераций муравьиного алгоритма (МА), который также является приближенным и существует в рамках научного направления Natural Computing — «Природные вычисления», которое объединяет математические методы и механизмы, обеспечивающие многолетнюю адаптацию биоценозов к окружающей среде [2–5]. Использованный МА также улучшен применением элитной стратегии. Кроме того, в данной версии МА используется модификация — «правило псевдослучайных пропорций», которая поддерживает баланс между использованием накопленных знаний и исследованием новых решений.

Рассматриваемый муравьиный алгоритм предполагает выполнение следующих шагов [6].

1. Инициализация: создание муравьев (каждый муравей помещается в начальную точку). Задается начальный уровень феромона (обычно небольшое положительное число) для того, чтобы на начальном этапе вероятности перехода в вершины не принимали нулевые значения.

2. На втором шаге определяются вероятности перехода k -го муравья из вершины i в вершину j . Для этого используем следующую формулу (1):

$$P_{i,j} = 100 \cdot \frac{\frac{1}{L_{i,j}^\beta} \cdot \tau_{i,j}^\alpha}{\sum \frac{1}{L_{i,j}^\beta} \cdot \tau_{i,j}^\alpha}, \quad (1)$$

где $\tau_{i,j}(t)$ — уровень феромона; L_{ij} — расстояние между вершинами i и j ; β и α — константные параметры.

При $\alpha = 0$ выбор ближайшего города наиболее вероятен, то есть алгоритм становится жадным. При $\beta = 0$ выбор происходит только на основании феромона.

3. На третьем шаге алгоритма применяется правило псевдослучайных пропорций, которое определяется простой формулой (2) и зависит от параметра q_0 :

$$s = \begin{cases} \max_{j \in allowed_k} \{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^b\}, & q < q_0 \\ r, & q \geq q_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где q — случайное число, распределенное по нормальному закону на отрезке $[0, 1]$; q_0 — параметр баланса между использованием накопленных знаний и исследованием новых решений ($0 \leq q_0 \leq 1$); r — случайный город, выбранный на основе вероятностей, расчет которых был произведен по формуле (1).

4. Пройдя ребро (i, j) , муравей откладывает на нем некоторое количество феромона, которое должно быть связано с оптимальностью сделанного выбора:

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & (i, j) \in T_k(t); \\ 0, & (i, j) \notin T_k(t). \end{cases}$$

Здесь Q — параметр, имеющий значение порядка цены оптимального решения; $T_k(t)$ — маршрут, пройденный муравьем k к моменту времени t ; $L_k(t)$ — длина этого маршрута.

5. Дополнительным улучшением алгоритма является ввод элитных муравьев. После каждой t -й итерации алгоритма происходит дополнительное обогащение феромоном ребер, входящих в маршрут лучшего на данный момент муравья.

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} e / L^{best}(t), & \text{если } (i, j) \in T^{best} \\ 0, & \text{если } (i, j) \notin T^{best}. \end{cases}$$

Особенностью генетического алгоритма, приведенного в данной статье, является то, что оптимальный маршрут находится посредством модели Гольдберга с использованием только лишь модифицированных операторов мутации (ОМ) без применения кроссовера. Мутация — случайное изменение одного или нескольких генов в хромосоме [7]. Оператор мутации позволяет разнообразить генотип в поколении, тем самым исключая возможность «застревания» в ловушке локальных минимумов и повышая точность работы алгоритма. Вероятность мутации p_m является фиксированным случайным числом на отрезке $[0; 1]$. Вероятность мутации в предложенном алгоритме составляет 100 %. В ходе вычислительных экспериментов, изложенных в работе [8], было определено, что наиболее близкие к оптимуму длины маршрутов получаются при использовании простого несимметричного двухточечного ОМ.

Несимметричный двухточечный ОМ выполняется следующим образом.

1. В хромосоме $P = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n-2}, a_{n-1}, a_n)$ определяются случайным образом две позиции (например, a_2 и a_{n-1}).
2. Гены, соответствующие выбранным позициям, переставляются, и формируется новая хромосома $P' = (a_1, a_{n-1}, a_3, \dots, a_{n-2}, a_2, a_n)$.

Для данной работы была выбрана стратегия «Сравнение мутирующей особи с предком, а далее — лучшей из них со случайной особью в поколении», которая показала себя как одна из лучших стратегий [9–10].

Алгоритм реализуется следующим образом.

1. Получаем значение элитной особи при помощи n запусков МА.
2. Ставим элитную особь на первое место в поколении.
3. Если m — номер особи, подверженной мутации, то $m = 2$.
4. Применяем к m -й особи оператор мутации.
5. Вычисляем значение целевой функции для мутирующей m -й особи и сравниваем его со значением целевой функции предка, а затем лучшее из них сравниваем со значением целевой функции случайно выбранной особи из поколения. Особь с наилучшим значением целевой функции добавляется в следующее поколение.
6. Устанавливаем $m = m + 1$ и повторяем шаг 5, пока каждая особь из поколения не подвергнется мутации.
7. Определяем особь с наилучшей приспособленностью (значением целевой функции) в поколении f_{onm} и ставим ее на первое место.
8. Проверяем, сколько итераций подряд значение f_{onm} было неизменно. Если f_{onm} было неизменным Nu итераций подряд, то конец работы, если меньше, чем Nu , то переходим к шагу 3.

Аналитически сделать выводы об эффективности данного алгоритма нельзя, поэтому был поставлен вычислительный эксперимент. Параметры использованного МА: число особей на итерации — 50, одна элитная особь, $\alpha = 1$, $\beta = 1$. Результаты вычислительного эксперимента для графа nBaeg29 (29 вершин, известное значение оптимума 1610) представлены в табл. 1, а для графа — brazil58 (58 вершин, известное значение оптимума 25395) при выборе элитной особи из трех запусков МА — в табл. 2, и при выборе из пяти запусков МА — в табл. 3.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента граф — pBaeg29 (число опытов — 35)

Число повторов/особей	Выбор элитной особи из 3				Выбор элитной особи из 5			
	Лучшее	Сред. знач.	Сред. знач. элиты	Сред. % улучш.	Лучшее	Сред. знач.	Сред. знач. элиты	Сред. % улучш.
250	1627	1782	1949	10,41	1615	1756	1921	10,25
500	1620	1746	1926	11,18	1610	1751	1901	9,35
750	1610	1709	1867	9,76	1610	1757	1924	10,32

Из табл. 1 видно, что элитная особь в среднем улучшается на $\approx 10\%$. Лучшее из полученных значений отстает от известного оптимального в худшем случае всего на $\approx 1\%$. А в большинстве случаев достигает оптимума. Среднее значение отстает от оптимума всего на 8,6 %.

Таблица 2

Выбор элитной особи из трех (граф — brazil58)

Число повторов/особей	20 запусков алгоритма				35 запусков алгоритма				50 запусков алгоритма			
	Лучшее	Сред.			Лучшее	Сред.			Лучшее	Сред.		
		Знач.	Знач. элиты	% улучш.		Знач.	Знач. элиты	% улучш.		Знач.	Знач. элиты	% улучш.
250	28260	30936	33596	10,47	28198	30238	33623	13,3	27004	30246	33492	12,78
500	27927	29922	33519	14,16	27031	29933	33303	13,3	27768	29923	33640	14,63
750	27662	29832	33937	16,16	28010	30221	33604	13,4	26942	30009	33692	14,50

Таблица 3

Выбор элитной особи из пяти (граф — brazil58)

Число повторов/особей	20 запусков алгоритма				35 запусков алгоритма				50 запусков алгоритма			
	Лучшее	Сред.			Лучшее	Сред.			Лучшее	Сред.		
		Знач.	Знач. элиты	% улучш.		Знач.	Знач. элиты	% улучш.		Знач.	Знач. элиты	% улучш.
250	27635	30024	33264	12,76	27608	29885	33265	13,3	27667	29972	32948	11,72
500	27779	29814	32745	11,54	27435	29850	33091	12,8	27443	29584	33084	13,78
750	27128	29156	32949	14,94	27506	29508	32977	13,7	26990	29598	33233	14,31

Анализ результатов вычислительного эксперимента позволяет построить диаграммы (рис. 1, 2, 3, 4, 5).

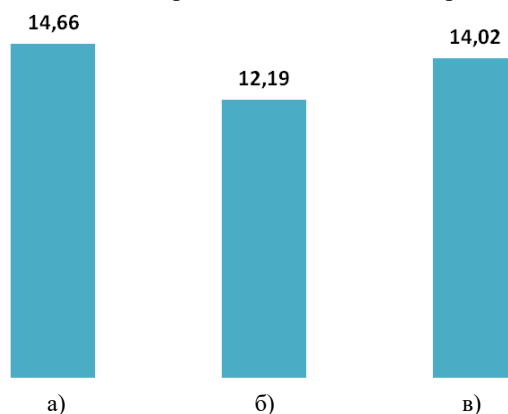


Рис. 1. Процент улучшения элитной особи генетическим алгоритмом (выбор из трех).
Количество особей и повторов: 750 (а), 250 (б), 500 (в)

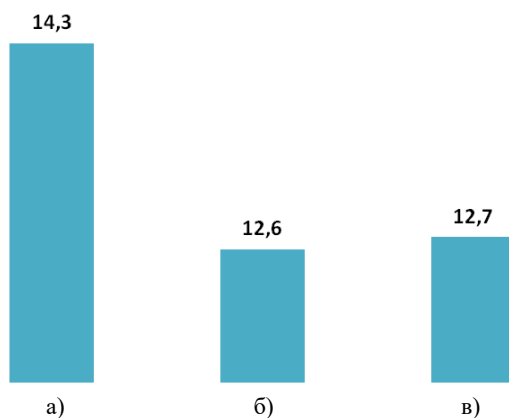


Рис. 2. Процент улучшения элитной особи генетическим алгоритмом (выбор из пяти).
Количество особей и повторов: 750 (а), 250 (б), 500 (в)

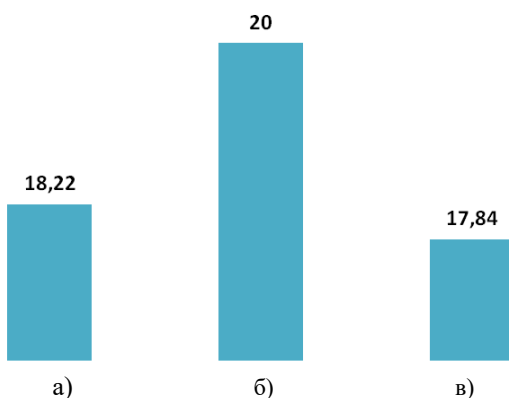


Рис. 3. Процент отклонения среднего значения от оптимального (выбор элиты из трех).
Количество особей и повторов: 750 (а), 250 (б), 500 (в)

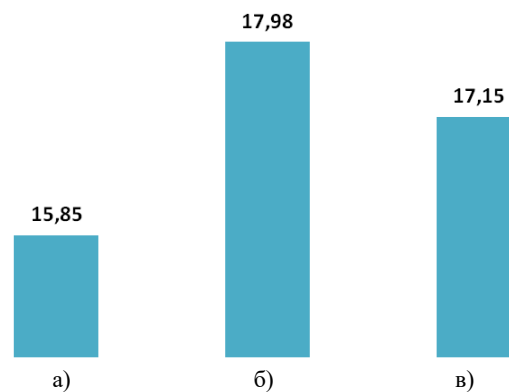


Рис. 4. Процент отклонения среднего значения от оптимального (выбор элиты из пяти).
Количество особей и повторов: 750 (а), 250 (б), 500 (в)

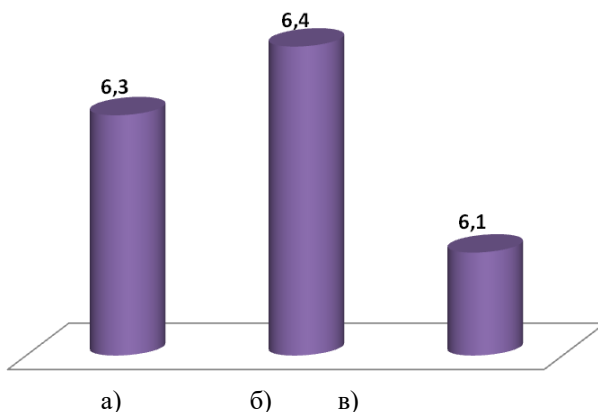


Рис. 5. Процент отклонения лучшего значения от оптимального (выбор элиты из трех).
Количество особей и повторов: 250 (а), 500 (б), 750 (в)

Анализируя результаты вычислительного эксперимента, можно отметить следующее: при увеличении количества вершин в графе процент улучшения элитной особи увеличился, что говорит о повышении эффективности работы алгоритма с ростом числа вершин в графе. При выборе элитной особи из пяти с двукратным увеличением числа вершин в графе процент отклонения среднего значения от оптимума увеличился приблизительно на 6 %, что вполне допустимо.

Для оценки эффективности работы алгоритма сравним его результаты с генетическим алгоритмом без элитной особи, но с той же стратегией отбора и таким же оператором мутации на графе *brazil* 58. Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результат работы генетического алгоритма без элитной особи

Число повторов/ особей	Среднее из 35 запусков	Лучшее из 35 запусков	% откл. среднего	% откл. лучшего
250	35223	29855	38,70	17,56
500	33829	29827	33,21	17,45
750	33716	28722	32,77	13,10

Выводы. Ввод элитной муравьиной особи позволил уменьшить процент отклонения лучшего из найденных значений более чем в 2 раза, а процент отклонения среднего значения — приблизительно на 18 %. Увеличение числа n при выборе элитной особи позволило увеличить эффективность алгоритма примерно на 2 %. Следует также отметить, что с увеличением числа особей и итераций алгоритма улучшаются значения целевой функции.

Библиографический список

1. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик — Москва : Физматлит, 2007. — 272 с.
2. Gambardella, L.-M. Ant-Q: A Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem [Электронный ресурс] / L.-M. Gambardella, M. Dorigo. — Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.40.4846> (дата обращения: 16.09.15).
3. Dorigo, M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents [Электронный ресурс] / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi. — Режим доступа: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.10-SMC96.pdf> (дата обращения: 20.09.15).
4. Gambardella, L.-M. Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies [Электронный ресурс] / L.-M. Gambardella, M. Dorigo. — Режим доступа: <http://ceit.aut.ac.ir/~meybodi/Learning%20Automata%20papers/LA-Papers-Ebdali/00542672.PDF> (дата обращения: 27.09.15).
5. Чураков, М. Муравьиные алгоритмы. / М. Чураков, А. Якушев. — Режим доступа: <http://rain.ifmo.ru/cat/> (дата обращения: 25.09.2015).
6. Штовба, С. Д. Муравьиные алгоритмы [Электронный ресурс] / С. Д. Штовба. — Режим доступа: http://www.serhiyshtovba.narod.ru/doc/Shtovba_Ant_Algorithms_Exponenta_Pro_2003_3.pdf (дата обращения: 25.09.15).
7. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. М. Курейчик, В. В. Курейчик. — Москва : Физматлит, 2003. — 432 с.
8. Кобак, В. Г. Сравнительный анализ модифицированной модели Гольдберга и муравьиного алгоритма при решении задачи коммивояжера / В. Г. Кобак, И. Ш. Рудова, А. Г. Жуковский // Тр. Сев.-Кавк. филиала Моск. техн. ун-та связи и информатики. — Ростов-на-Дону, 2015. — Т. 1. — С. 362–365.
9. Кобак, В. Г. Решение задачи коммивояжера модифицированной моделью Гольдберга с использованием различных сильных мутаций / В. Г. Кобак, И. Ш. Рудова // Сб. тр. юбилейной конф. студентов и молодых ученых, посвященной 85-летию ДГТУ. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 146–156.
10. Решение задачи коммивояжера модифицированной моделью Гольдберга с помощью различного вида мутаций / В. Г. Кобак [и др.] // Тр. Сев.-Кавк. филиала Моск. техн. ун-та связи и информатики. — Ростов-на-Дону, 2014. — Т. 1. — С. 258–261.

References

1. Gladkov, L.A., Kureychik, V.V., Kureychik, V.M. Geneticheskie algoritmy. [Genetic algorithms.] Moscow: Fizmatlit, 2007, 272 p. (in Russian).
2. Gambardella, L.-M., Dorigo, M. Ant-Q: A Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.40.4846> (accessed: 16.09.15).
3. Dorigo, M., Maniezzo, V., Coloni, A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. Available at: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.10-SMC96.pdf> (accessed: 20.09.15).
4. Gambardella, L.-M., Dorigo, M. Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies. Available at: <http://ceit.aut.ac.ir/~meybodi/Learning%20Automata%20papers/LA-Papers-Ebdali/00542672.PDF> (accessed: 27.09.15).
5. Churakov, M., Yakushev, A. Murav'inye algoritmy. [Ant colony algorithms.] Available at: <http://rain.ifmo.ru/cat/> (accessed: 25.09.2015) (in Russian).
6. Shtovba, S.D. Murav'inye algoritmy. [Ant colony algorithms.] Available at: http://www.serhiyshtovba.narod.ru/doc/Shtovba_Ant_Algorithms_Exponenta_Pro_2003_3.pdf (accessed: 25.09.15) (in Russian).
7. Yemelyanov, V.V., Kureychik, V.M., Kureychik, V.V. Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya. [Theory and practice of evolutionary modeling.] Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p. (in Russian).
8. Kobak, V.G., Rudova, I.S., Zhukovskiy, A.G. Sravnitel'nyy analiz modifitsirovannoy modeli Gol'dberga i murav'inogo algoritma pri reshenii zadachi kommivoyazhera. [Comparative analysis of Goldberg modified model and ant colony algorithm for solving the traveling salesman problem.] Proc. of Moscow Technical University of Communications and Informatics, North Caucasian Branch. Rostov-on-Don, 2015, vol. 1, pp. 362–365 p. (in Russian).
9. Kobak, V.G., Rudova, I.S. Reshenie zadachi kommivoyazhera modifitsirovannoy model'yu Gol'dberga s ispol'zovaniem razlichnykh sil'nykh mutatsiy. [Traveling salesman problem solution by Goldberg modified model using different strong mutations.] Proc. Conf. of students and young researchers dedicated to the 85th Anniversary of DSTU. Rostov-on-Don, 2015, pp. 146–156 (in Russian).
10. Kobak, V.G., et al. Reshenie zadachi kommivoyazhera modifitsirovannoy model'yu Gol'dberga s pomoshch'yu razlichnogo vida mutatsiy. [Traveling salesman problem solution by Goldberg modified model by different strong mutations.] Proc. of Moscow Technical University of Communications and Informatics, North Caucasian Branch. Rostov-on-Don, 2014, vol. 1, pp. 258–261 (in Russian).

Поступила в редакцию 03.11.2015

Сдана в редакцию 03.11.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 631.517:631.415.330.138.1

DOI 10.12737/19690

Reliability-Based Design Optimization Strategy for Soil Tillage Equipment Considering Soil Parameter Uncertainty *

M. G. Kharmanda¹, I. R. Antypas^{2**}¹ Department of Biomedical Engineering, Lund University, Sweden² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Стратегия оптимизации проектирования надежности почвообрабатывающей техники с учетом параметрической неопределенности почвы ***

М. Г. Харманда¹, И. Р. Антипас^{2 **}¹ Лундский университет, г.Лунд, Швеция² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

The objective of this work is to provide an efficient tool of Reliability-Based Design Optimization (RBDO) for soil tillage machine design process in order to achieve designs with a required reliability (safety) level. An efficient methodology that controls the reliability levels for different statistical distribution cases of random soil properties is developed. This developed strategy is based on design sensitivity concepts in order to determine the influence of each random parameter. The application of this method consists in taking into account the uncertainties on the soil tillage forces. The tillage forces are calculated in accordance with analytical model of McKyes and Ali with some modifications to include the effect of both soil-metal adhesion and tool speed. The different results show the importance of the developed strategy to improve the performance of the soil tillage equipments considering both random geometry and loading parameters.

Keywords: design, optimization, structural reliability, random variables, soil properties, soil tillage equipment.

Целью данной работы является разработка эффективного и надежного метода проектирования почвообрабатывающих машин для получения конструкции с требуемой надежностью и высоким уровнем безопасности. Разработана эффективная методология, контролирующая уровень надежности для различных ситуаций статистического распределения изученных случайных свойств почвы. Разработанный метод основан на концепции чувствительности конструкции, обеспечивающей способность определять влияние каждого случайного параметра. Особенность этого метода состоит в том, что он принимает в расчет неопределенные силы при обработке почвы. Силы почвообрабатывающей техники рассчитываются в соответствии с аналитической моделью McKyes и Али с некоторыми изменениями, включающими влияние как адгезии почвы и металла, так и скорости машины. Различные результаты показывают важность разработанного метода для повышения производительности почвообрабатывающих машин с учетом и случайной геометрии, и заданных параметров.

Ключевые слова: проектирование, оптимизация, надежность конструкции, случайные переменные, свойства почвы, почвообрабатывающая техника.

Introduction

In the deterministic design optimization [1,2], the designer aims to reduce the engineering design cost without caring about the effects of uncertainties concerning materials, geometry and loading. The resulting optimal solution may therefore represent an inappropriate reliability level. However, the integration of reliability analysis during the optimization process leads to reduce the structural weight in uncritical regions that does not only provide an improved design but also a higher level of confidence in the design. This approach can be carried out in two separate spaces: the physical space and the normalized space. Since many repeated searches are needed in the above two spaces, the computational time for such an optimization is a big problem. The solution of the above nested problems leads to a high computational cost, especially for large-scale structures. The major difficulty lies in the structural reliability evaluation, which is carried out by a special optimization

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: mgk@scs-net.org, Imad.antypas@mail.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

procedure. In order to improve the numerical performance, an efficient method is developed based on the optimality conditions. In this work, we use a statistical study of the soil tillage forces, based on soil property randomness.

Soil Tillage Forces

There are many methods and models had been used to predict the forces acting on the tillage tool. However, the majority of researchers have used the general earth pressure model, proposed by Reece [3]. The total force acting on the tillage tool can be written as follows:

$$P = P_\gamma + P_c + P_{ca} + P_q + P_a \quad (1)$$

Here, P is the total soil cutting force acting on the tillage tool (kN), P_γ is the force acting on the tillage tool caused by soil gravity (kN), P_c is the force acting on the tillage tool caused by cohesion (kN), P_{ca} is the force acting on the tillage tool caused by adhesion (kN), P_q is the force acting on the tillage tool caused by surcharge pressure (kN) and P_a is the force acting on the tillage tool caused by tool speed (kN). The different force components are given by the following equations:

$$P_\gamma = \gamma \cdot d^2 \cdot w \cdot N_\gamma \quad (2)$$

$$P_c = c \cdot d \cdot w \cdot N_c \quad (3)$$

$$P_{ca} = c_a \cdot d \cdot w \cdot N_{ca} \quad (4)$$

$$P_q = q \cdot d \cdot w \cdot N_q \quad (5)$$

$$P_a = \gamma \cdot v^2 \cdot d \cdot w \cdot N_a \quad (6)$$

with: γ : Soil bulk density (kN/m^3), d : Tool working depth (m), c : Soil internal cohesion (kPa), c_a : Soil-metal adhesion (kPa), q : Surcharge pressure at the soil surface (kPa), v : Forward tool speed (m/s^2), w : Tool width (m), N_a : Inertial coefficient (dimensionless), N_{ca} : Adhesion coefficient (dimensionless), N_c : Cohesion coefficient (dimensionless), N_q : Surcharge pressure coefficient (dimensionless), N_γ : Gravity coefficient (dimensionless)

The coefficients ($N_a, N_{ca}, N_c, N_q, N_\gamma$) are defined according to the soil failure model. In this work, we use McKyes and Ali's model [3] to determine these N -factors. We select this model according to its simplicity and accuracy [4]. McKyes and Ali assumed that the soil failure surface from the tool tip to the soil surface was linear, and made an unknown angle β_r with the soil surface, Fig. 1. The forward distance of the failure crescent from the blade on the surface was assumed to be equal to the radius r of the crescent.

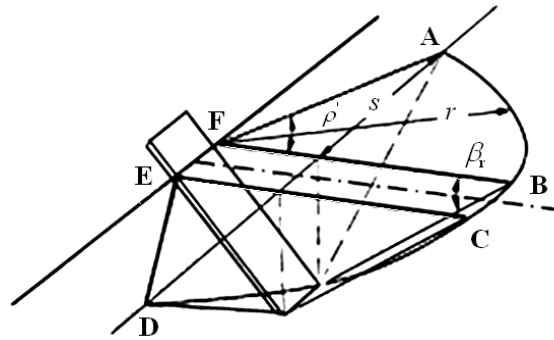


Fig. 1: Proposed soil failure model for narrow blades

The forces acting on the soil segment are illustrated in Fig. 2, including the effects of the density of soil γ , the internal friction angle ϕ , the soil-metal friction angle on the blade surface δ , the soil cohesion c , the soil-metal adhesion c_a and the surface surcharge pressure q .

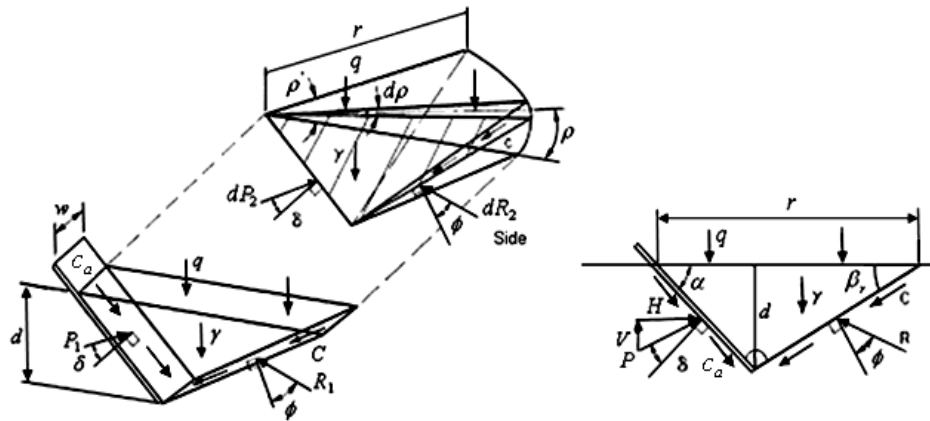


Fig. 2 Forces acting on the soil segment

According to McKays and Ali's model, Eq. (1) can be written:

$$P = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot r \cdot \left(1 + \frac{2s}{3w} \right) \cdot \sin(\beta_r + \varphi) + c \cdot \frac{\cos(\varphi)}{\sin(\beta_r)} \cdot \left(1 + \frac{s}{w} \right) + q \cdot \frac{r}{d} \cdot \sin(\beta_r + \varphi) \cdot \left(1 + \frac{s}{w} \right) + \dots \right. \\ \left. c_a \left[\sin(\beta_r + \varphi) - \cot(\alpha) \cdot \cos(\beta_r + \varphi) \right] + \gamma \cdot v^2 \cdot \left[\frac{\sin(\beta_r + \varphi)}{\cot(\alpha)} + \frac{\cos(\beta_r + \varphi)}{\tan(\beta_r) \cdot \cot(\alpha)} \right] \cdot \left(1 + \frac{s}{w} \right) \right] \cdot \frac{d \cdot w}{\sin(\alpha + \beta_r + \delta + \varphi)} \quad (7)$$

Here, r is the distance from the blade to the forward failure plan (m), given by:

$$r = d \cdot [\cot(\alpha) + \cot(\beta_r)] \quad (8)$$

s is the width of the side crescent (m), given by:

$$s = d \cdot \sqrt{\cot^2(\beta_r) + 2 \cdot \cot(\alpha) \cdot \cot(\beta_r)} \quad (9)$$

α is the Rack angle of the tool from the horizontal (deg), β_r is the angle of the soil failure zone (deg), δ is the angle of soil-metal friction (deg) and φ is the angle of internal soil friction (deg). The calculated force in Eq. (7) is a function of the unknown angle β_r . McKyes and Ali obtained this angle β_r by minimizing the dimensionless term of gravity N_γ . The horizontal force (H) and the vertical one (V) are obtained by combining P with force of adhesion [4] as follows:

$$H = P \cdot \sin(\alpha + \delta) + c_a \cdot d \cdot w \cdot \cot(\alpha) \quad (10)$$

$$V = P \cdot \cos(\alpha + \delta) - c_a \cdot d \cdot w \quad (11)$$

Structural Reliability

In structural reliability theory many effective techniques have been developed during the last 40 years to estimate the reliability, namely FORM (First Order Reliability Methods), SORM (Second Order Reliability Method) and simulation techniques, see e.g. [5,6]. Here, we consider two kinds of variables: Design variables and Random variables. The image of the random variables in the standard normalized space (Figure 3b) is denoted u , calculated by: $u = T(y)$ where $T(y)$ is the probabilistic transformation function applied on the physical space (Figure 3a).

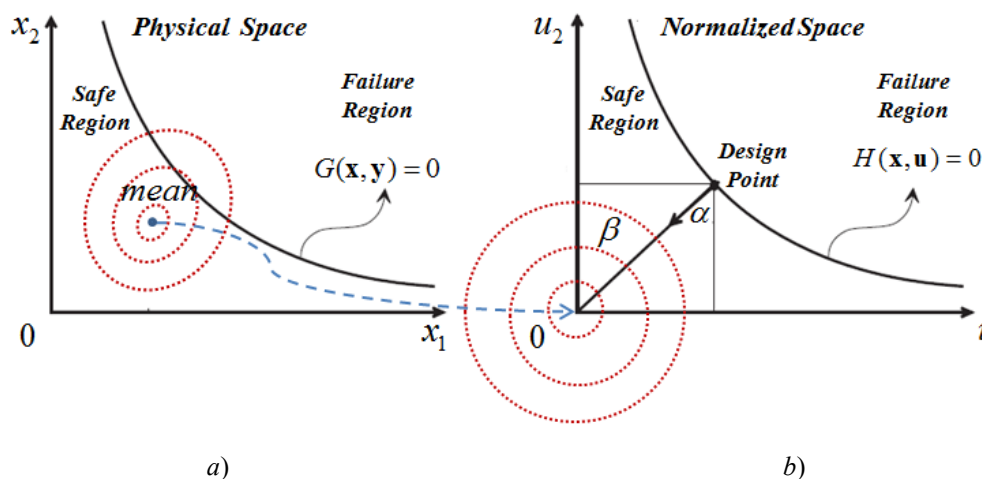


Fig. 3: a) Physical spaces, b) normalized spaces.

For a given failure scenario, the reliability index β is evaluated by solving a constrained minimization problem:

$$\beta = \min d(u) \quad \text{subject to: } H(u) \leq 0 \quad (12)$$

with

$$d = \sqrt{\sum u_i^2} \quad (13)$$

where u is the vector modulus in the normalized space, measured from the origin see Figure (3). The solution to problem (12) defines the design point P^* , see Figure (3b). The resulting minimum distance between the limit state function $H(u)$ and the origin, is called the reliability index β .

Reliability-Based Design Optimization (RBDO)

Traditionally, for the reliability-based optimization procedure we use two spaces: the physical space and the normalized space see [7]. Therefore, the reliability-based optimization is performed by nesting the following two problems:

Problem I: Optimization problem: this problem seeks to minimize an objective function subject to deterministic constraints and reliability requirements which is defined as follow:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{subject to} \quad & g_k(x) \leq 0, \quad k = 1, \dots, K \\ \text{and} \quad & \beta(x, u) \geq \beta_t \end{aligned} \quad (14)$$

where $f(x)$ is the objective function, $g_k(x) \leq 0$ are the associated constraints, $\beta(x, u)$ is the reliability index of the structure, and β_t is the target reliability.

Problem II: Reliability analysis: the reliability index $\beta(x, u)$ is the minimum distance between the limit state function $H(u)$ and the origin, see Figure 3b. This index is determined by solving the minimization problem:

$$\begin{aligned} \min \quad & d(u) \\ \text{subject to} \quad & H(u) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

where $d(u)$ is the distance in the normalized random space, given by $d = \sqrt{\sum u_i^2}$, and $H(u)$ is the performance function (or limit state function) in the normalized space, defined such that $H(u) \leq 0$ implies failure, see Figure 3b. In the physical space, the image of $H(u)$ is the limit state function $G(y)$, see Figure 3a [8]. Using the classical approach, the RBDO process is carried out in two spaces, that leads to a high computational time problem. A hybrid approach based on simultaneous solution of the reliability and the optimization problem is developed [9]. This approach consists in minimizing a new form of the objective function $F(x, y)$ subject to a limit state and to deterministic as well as to reliability constraints:

$$\begin{aligned} \min \quad & F(x, y) = f(x) \cdot d_\beta(x, y) \\ \text{subject to} \quad & G(y) \leq 0 \\ & g_k(x) \geq 0, \quad k = 1, \dots, K \\ \text{and} \quad & \beta(x, u) \geq \beta_t \end{aligned} \quad (16)$$

Here, $d_\beta(x, y)$ is the distance in the hybrid space between the optimum and the design point, $d_\beta(x, y) = d(u)$. The minimization of the function $F(x, y)$ is carried out in the Hybrid Design Space (HDS) of deterministic variables x and random variables y .

Optimum Safety Factor Developments

Formulation Developments

At the MPP, u^* , is the solution of the Karush–Kuhn–Tucker (KKT) conditions [1] of the FORM optimization problem (1).

$$u_i^* = -\beta \frac{\frac{\partial H}{\partial u_i}}{\left\| \frac{\partial H}{\partial u_i} \right\|} \quad (17)$$

The derivative of the limit state H with respect to u and the derivative of u with respect to the design variable x can be expanded in terms of the original random variables y as follows:

$$\frac{\partial H}{\partial u_i} = \frac{\partial G}{\partial y_k} \frac{\partial T_k^{-1}(u)}{\partial u_i} \quad \text{and} \quad \frac{\partial u^*}{\partial x_i} = \frac{\partial T_k(u)}{\partial y_k} \frac{\partial x^*}{\partial y_k} \quad (18)$$

For simplicity, consider now the case of n normalized variables u_i , $i = 1, \dots, n$, (see Figure 4: two normalized variables u_1 and u_2). For an assumed failure scenario, we define $H(u) \leq 0$ and $G(y) \leq 0$ as limit state functions in the normalized space (u -space) and in physical one (y -space). Here, the design point P^* can be calculated by

$$\begin{aligned} \min \quad & d^2 = u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2 \\ \text{subject to:} \quad & H(u_1, u_2, \dots, u_n) \leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

The Lagrangian function for the problem (19) can be written as

$$L(u, \lambda, s) = d^2(u) + \lambda \cdot [H(u) + s^2] \quad (20)$$

where the inequality constraint in (19) is adjoined by means of the Lagrange multiplier λ , after having converted the inequality constraint into the equality $H(u) + s^2 = 0$ by introducing the real slack variable s . The optimality conditions for the Lagrangian are:

$$\frac{\partial L}{\partial u_i} = \frac{\partial d^2}{\partial u_i} + \lambda \frac{\partial H}{\partial u_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = H(u) + s^2 = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial s} = 2s\lambda = 0 \quad (23)$$

The optimality condition for L with respect to s yields the so-called *switching condition* $s\lambda = 0$, and the necessary condition $\partial^2 L / \partial s^2 \geq 0$ for a minimum of L implies that the Lagrangian multiplier λ must be non-negative, i.e., $\lambda \geq 0$. Due to condition (23), we can distinguish between two cases:

Case 1: If the real slack variable is non-zero ($s \neq 0$), the Lagrangian multiplier has to be zero ($\lambda = 0$) and the limit state function must be less than zero ($H(u) < 0$), which corresponds to the case of safety.

Case 2: If the real slack variable is zero ($s = 0$), the Lagrangian multiplier is non-negative ($\lambda \geq 0$) and the limit state is defined by the equality constraint $H(u) = 0$. The solution here is found on the limit state surface and represents the *Design Point*.

The first case is not suitable to our reliability-based study whereas the second one is basic for our approach. Using the expression for the square distance d^2 in equation (19), we get:

$$u_i = -\frac{\lambda}{2} \frac{\partial H}{\partial u_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad (24)$$

Problem (17) gives us the reliability index β as the minimum distance between the limit state surface and the origin. This means that the resulting reliability index may be lower or higher than the target reliability index β_t . As we seek to satisfy a required target reliability level for the optimization problem, we can write

$$\beta_t^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (25)$$

To determine λ in (24), we now substitute index i by j in (24), square both sides of the equation, and sum from $j=1$ to n . Using (25), we then obtain

$$\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 = \frac{\beta_t^2}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial u_j}\right)^2} \quad (26)$$

which upon substitution into (24) yields the following expression for the normalized variable u_i ,

$$u_i = \pm \beta_t \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial u_i}\right)^2}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial u_j}\right)^2}} \quad (27)$$

Equation (27) at the optimum value of the normalized vector can be written in the following form:

$$u_i^* = \pm \beta_t \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial u_i}\right)^2}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial u_j}\right)^2}} \quad (28)$$

where the sign of \pm depends on the sign of the derivative, i.e.,

$$\frac{\partial G}{\partial y_i} > 0 \Leftrightarrow u_i^* > 1 \quad \text{and} \quad \frac{\partial G}{\partial y_i} < 0 \Leftrightarrow u_i^* < 1 \quad (29)$$

The calculation of the normalized gradient $\partial H / \partial u$ is not directly accessible because the mechanical analysis is carried out in the physical space rather than in the standard space. However, using theory of statistics we can derive the following expression from which the computation of the normalized gradient can be carried out by applying the chain rule on the physical gradient $\partial G / \partial y$:

$$\frac{\partial H}{\partial u_i} = \frac{\partial G}{\partial y_k} \frac{\partial T_k^{-1}(u)}{\partial u_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, K \quad (30)$$

where $T^{-1}(u)$ denotes the inverse mapping of $u=T(y)$ from standard normalized space u into the random space y . It is not easy to find the derivative of the inverted probabilistic transformation function $T^{-1}(u)$ with respect to u . Since the calculation of the normalized gradient vector $\partial H / \partial u$ is not directly accessible and according to our several numerical applications, we find that the normalized gradient in equation (25) considering equation (30) can be expressed as

$$\frac{\partial H}{\partial u_i} = \sqrt{\frac{\partial G}{\partial y_i}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (31)$$

Equation (27) at the optimum value of the normalized vector can be written in the following form:

$$u_i^* = \beta_i \sqrt{\frac{\left| \frac{\partial G}{\partial y_i} \right|}{\sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial G}{\partial y_j} \right|}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (32)$$

where the sign of \pm depends on the sign of the derivative, i.e.,

$$\frac{\partial G}{\partial y_i} > 0 \Leftrightarrow u_i^* > 1 \quad \text{and} \quad \frac{\partial G}{\partial y_i} < 0 \Leftrightarrow u_i^* < 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (33)$$

Statistical Developments

According to the reliability index definition of Hasofer-Lind [5], an iso-probabilistic transformation can be carried out between the physical space and normalized one (Figure 3). The target reliability index that corresponds to the failure of probability, is numerically computed as follows

$$P_f \approx \Phi(-\beta_f) \quad \text{or} \quad \beta_f \approx -\Phi^{-1}(P_f) \quad (34)$$

where $\Phi(\cdot)$ is the standard Gaussian cumulated function given as follows:

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (35)$$

Using the basic definition of Hasofer-Lind reliability index (34), we consider a simple normalized mapping transformation for the five most commonly used probabilistic distributions (normal, lognormal, uniform, Gumbel and Weibull distributions).

OSF for normal distribution

In general, when considering the normal distribution law, the transformation between the physical space (or x -Space) and the normalized space (or u -Space) is defined by

$$y_i = x_i + \sigma_i u_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (36)$$

So the design point can be defined as:

$$y_i = S_{f_i} x_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (37)$$

Note that using equations (36) and (37), the optimum safety factor associated with u_i^* can be written as

$$S_{f_i} = 1 + \gamma_i \cdot u_i^*, \quad i = 1, \dots, n \quad (38)$$

where the variance coefficient γ_i relating the mean m_i and standard-deviation σ_i equals to: $\gamma_i = \sigma_i / m_i$.

OSF for lognormal distribution

For lognormal distribution law, the transformation is defined by

$$y_i = e^{\mu_i + \zeta_i u_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad (39)$$

When considering the lognormal distribution and assuming a single limit state failure scenario $G(y) \leq 0$, the equation for the optimum safety factor can be written in a way similar to that presented in section 5.2.1. Hence, we get the optimum

safety factors in terms of the optimum values of the normalized variables u_i^* (see equation (32)), and the equation for the optimum safety factors can be written as

$$S_{fi} = \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_i^2}} \exp\left(\sqrt{\ln(1+\gamma_i^2)} \cdot u_i^*\right), \quad i=1, \dots, n \quad (40)$$

OSF for uniform distribution

For uniform distribution law, the transformation is defined by

$$y_i = a + (b-a)\Phi(U_i), \quad i=1, \dots, n \quad (41)$$

and the normalized variables u_i are given by

$$u_i = \Phi^{-1}\left(\frac{y_i - a}{b - a}\right), \quad i=1, \dots, n \quad (42)$$

where a and b are the end (bound) values of the interval for y_i , and Φ is the distribution function. The mean value m_i is given by

$$m_i = x_i = \frac{a+b}{2}, \quad i=1, \dots, n \quad (43)$$

and the standard deviation σ_i by

$$\sigma_i = \frac{b-a}{\sqrt{12}}, \quad i=1, \dots, n \quad (44)$$

Using equations (18), (34) and (41), we get the following expression for the optimum safety factor corresponding to the optimum value of the normalized variable

$$u_i^* : S_{fi} = 1 - \sqrt{3}\gamma_i(1 - 2\Phi(u_i^*)), \quad i=1, \dots, n \quad (45)$$

OSF for Weibull distribution

For Weibull distribution law, the transformation is defined by

$$y_i = v[-\ln(\Phi(-U_i))]^{1/k} \quad (46)$$

with $\Phi(-U) = 1 - \Phi(U)$, k : shape factor >0 , v : measure factor >0 , the mean is given by:

$$m_i = v\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \Rightarrow v = \frac{m_i}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (47)$$

and the standard-deviation is given by:

$$\sigma_i^2 = v^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \Leftrightarrow \gamma_i = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1} \quad (48)$$

where $\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx$ or a factorial form $\Gamma(a) = (a-1)!$ for integers. This way the equation of optimum safety factor can be written as:

$$S_{fi} = \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} [-\ln(\Phi(-u_i^*))]^{1/k} \quad (49)$$

OSF for Gumbel distribution

For Weibull distribution law, the transformation is defined by

$$y_i = v - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln(\Phi(u_i))] \quad (50)$$

where the mean is given by:

$$m_i = v + \left(\frac{0.577}{\alpha}\right) \Rightarrow v = m_i - \left(\frac{0.577}{\alpha}\right) \quad (51)$$

and the standard-deviation is given by:

$$\sigma_i = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha} \Rightarrow \alpha = \frac{\pi^2}{6\sigma_i^2} \quad (52)$$

Using (37) and (52), equation (41a) can be written as

$$S_{f_i}^{1,2} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{24}{\pi^2} \gamma_i^2 y_i \left(0.577 - \ln \left[-\ln \left(\Phi(u_i^*) \right) \right] \right)} \right) \quad (53)$$

Using these safety factors, we can satisfy the required reliability level and significantly reduce the complexity of the problem.

OSF Algorithm

The Optimum Safety Factor (OSF) algorithm can be easily implemented in three principal steps (Fig. 4):

1. **Determine the design point:** we consider the most active constraint as a limit state function $G(\mathbf{y})$. The optimization problem is to minimize the objective function subject to the limit state and the deterministic constraints. The resulting solution is considered as the most probable failure point and is termed the design point.

2. **Compute the safety factors:** in order to compute these factors using equations (38), (40), (45), (49) and (53), a sensitivity analysis of the limit state function with respect to all variables is required. When the number of the deterministic variables is equal to that of the random ones, there is no need for additional computational cost when the gradient calculation is carried out during the optimization process of the design point. If the number of the deterministic variables is different from that of the random ones, we need only to evaluate the sensitivity of the limit state function with respect to those random variables that are not common with the deterministic.

3. **Calculate the optimal solution:** in the last step, we include the values of the safety factors in the computation of the values of the design variables and then determine the optimum design of the structure.

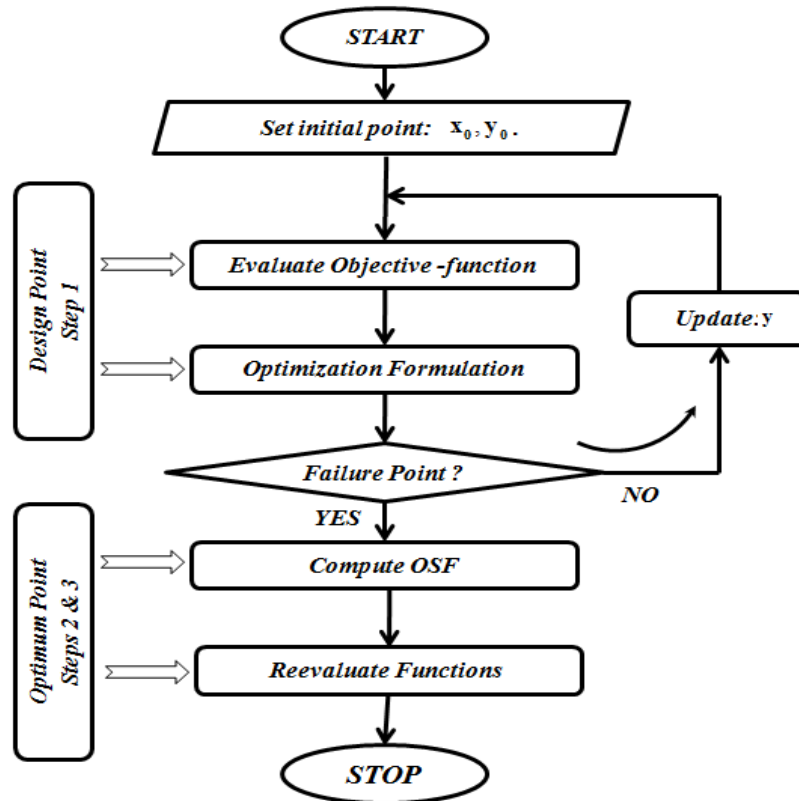


Fig. 4: Flowchart of OSF approach

Numerical Application

Problem Description

The studied chisel plough illustrated in Fig. 6, can be used primarily to realize the weed control, the seedbed preparation, and other secondary tillage operations. According to the deterministic design studies, the designer proposes a global safety factor on the yield stress value. The RBDO solution can reduce the structural weight in uncritical regions. It does not only provide an improved design but also a higher level of confidence in the design. For example, the allowable stress design methods use a safety factor to compute the allowable stresses in members from the ultimate stress, and a successful design ensures that the stresses caused by the values of the loads do not exceed the allowable stresses $\sigma_w = \sigma_y / S_f$ where S_f is the global safety factor. The values of the proposed safety factors principally depend on the engineering experience that may lead to low reliability level or to high cost. In this application, we consider that the studied parameters are presented by

probabilistic characteristics. Let us consider that the horizontal and vertical forces follow lognormal distribution laws and their probabilistic characteristics are presented in Table 1.

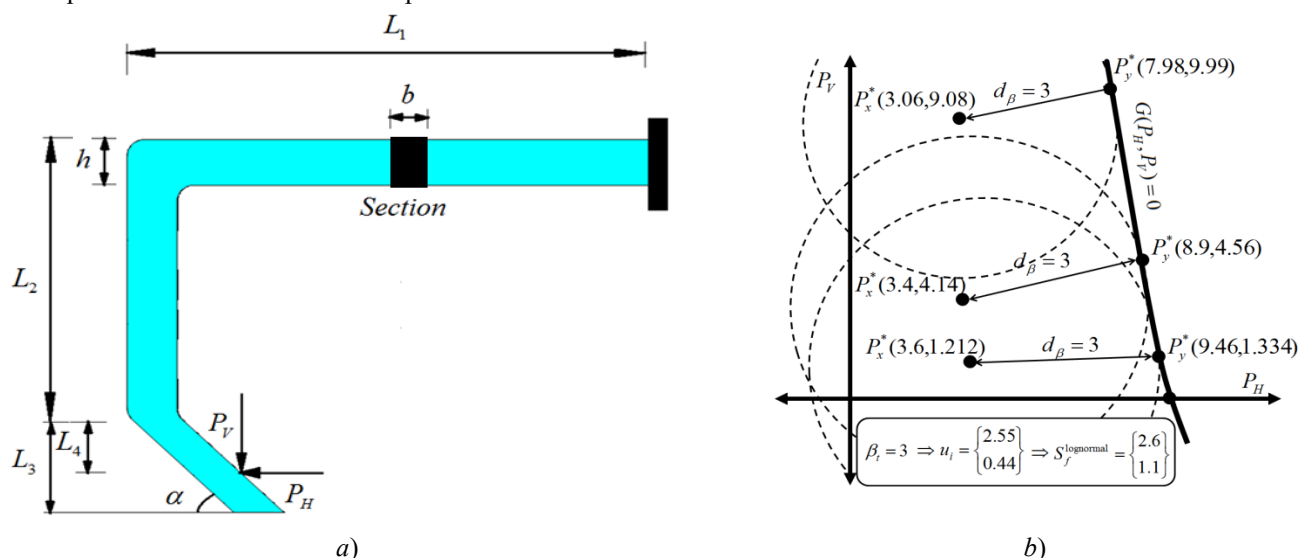


Fig. 5: a) Schematic drawing of the chisel plough shank with acting forces, b) Two dimensional optimization problem

Table 1

Probabilistic characteristics of tillage forces

Force Type	Distribution Type	Distribution Parameters	Mean Value	Standard-Deviation
P_H (kN)	Lognormal	$\mu = 0,815, \xi = 0.421$	2,463	1,044
P_V (kN)	Lognormal	$\mu = -0,052, \xi = 0.415$	1,032	0,427

The performance criterion, related to the mechanical resistance of tillage machines is determined by the difference between the yield stress and the maximum stress. Therefore, the limit state function that defined the safe region can be written using the following equation:

$$G(y) = \sigma_{\max} - \sigma_y \leq 0 \quad (54)$$

Here, \mathbf{x} is the vector of deterministic variables and \mathbf{y} is the vector of random variables, σ_y is the yield stress and σ_{\max} is the maximum stress that is given by:

$$\sigma_{\max} = \frac{6}{b \cdot h^2} \left[(L_2 + L_4) \cdot P_H + \frac{L_4}{\tan(\alpha)} \cdot P_V \right] + \frac{1}{b \cdot h} \cdot P_H \quad (55)$$

The limit state function of the simplified shank model, illustrated in Fig. 6, is a function of the following variables as: $G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = f(P_H, P_V, \alpha, b, h, L_2, L_4)$. The input geometrical parameters of the studied shank are: $L_1 = 600 \text{ mm}$, $L_2 = 350 \text{ mm}$, $L_3 = 150 \text{ mm}$, $L_4 = 75 \text{ mm}$, $\alpha = 45^\circ$, $b = 32 \text{ mm}$ and $h = 58 \text{ mm}$.

RBDO under Random Loading

Considering given values of the horizontal and vertical forces as: $P_H = 2,463 \text{ (kN)}$ and $P_V = 1,032 \text{ (kN)}$, the corresponding maximum stress value (using equation (55)) of the initial point equals to: $\sigma_{\max} = 63,99 \text{ (MPa)}$. The global safety factor of this point can be calculated by $S_f = \sigma_y / \sigma_{\max}$. Using this equation, we get that the global safety factor equals to: $S_f = 3,67$. Here, we should estimate the reliability level of this structure using equations (12) and (13).

Table 2

Reliability analysis of the studied shank

Parameters	P_H (kN)	P_V (kN)	σ_{\max} (MPa)	β	P_f
Actual Solution	2,463	1,032	63,99	4,99	3×10^{-7}
Design Point	8,907	4,560	234,91		

Considering two variable problems, the optimization process using ANSYS software (First Order Method) leads to the coordinates of the design point or so-called MPP (Most Probable failure Point) and the actual point (see Table 2). The reliability index of the studied structure equals to: $\beta = 4,99$ that corresponds to probability of failure $P_f \approx 3 \times 10^{-7}$ using equation (34). In fact, the nuclear and spatial studies necessitate very small failure probability, the failure probability should be: $P_f \in [10^{-6} - 10^{-8}]$ that corresponds to a reliability index $\beta \in [4,75 - 5,6]$ however in structural studies, the failure probability should be: $P_f \in [10^{-3} - 10^{-5}]$ that corresponds to a reliability index $\beta \in [3 - 4,25]$.

Table 3

RBDO of the studied shank

Parameters	$P_H (kN)$	$P_V (kN)$	$\sigma_{\max} (MPa)$	β	P_f
Optimum Solution	3,420	4,141	100,16	3,00	1×10^{-3}
Design Point	8,907	4,560	234,91		

Therefore, we should improve the design reliability to be: $\beta_t = 3$ using the recent technology of RBDO based on our OSF developments. Since the loads presented by the horizontal and vertical forces follow the lognormal distribution law, we use equation (40) to compute analytically the optimum safety factors of the loads. Table 3 shows the coordinates of the optimum solution points of the RBDO technology. Figure 7 shows a geometrical description of several solutions. All design points P_y^* are located on the failure limit state ($G(P_H, P_V) = 0$) and the optimum solution points P_x^* are located at the required distance $d_\beta = 3$ from the design points.

RBDO under Random Geometry and Loading

Here, we consider the randomness of both geometry and loading parameters. In order to show the influence of different parameters on the maximum stress values, we perform a sensitivity analysis of the maximum stress relative to the geometry and loading. Table 4 defines the sensitivities of the maximum stress with respect to geometry and loading parameters. We note that the derivatives with respect to both parameters L_1 and L_3 equal to zeros. Here, we can ignore the influence of these two parameters on the maximum stress values. Therefore, we deal with four geometry parameters (b , h , L_2 , L_4 and α) and with two loading parameters (P_H and P_V).

Table 4

Sensitivity analysis of the maximum stress function

Type	Geometry							Loading	
Sensitivity Functions	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial b}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial h}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial L_1}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial L_2}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial L_3}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial L_4}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial P_H}$	$\frac{\partial \sigma_{\max}}{\partial P_V}$
Sensitivity Values	-1,99	-2,18	0,000	0,137	0,000	0,195	-0,15	0,024	0,0042

Table 5 presents the RBDO results when applying the developed OSF equations for different distribution laws. Table 1 presents the probabilistic data. For both horizontal and vertical forces, the distribution laws (lognormal), the means and the standard-deviations are presented in Table 1 as given data. To compute the OSF, we use equation (40). Since we apply the new strategy on the randomness of the geometry parameters with object of demonstrating its efficiency, the standard-deviations of the random geometry parameters are considered as proportional values of the means ($\sigma_i = 0,1m_i$) for simplicity.

Table 5

RBDO of the studied shank under geometry and loading uncertainty

Random Parameters	Distribution Laws	OSF S_{f_i}	Normalized Variable u_i	Design Point y_i	Optimum Solution x_i
$b(mm)$	Uniform	0,835	-1,958	31,687	37,917
$h(mm)$	Uniform	0,835	-2,046	57,673	69,077
$L_2(mm)$	Normal	0,949	0,5133	350,47	332,48
$L_4(mm)$	Weibull	1,303	0,6114	75,174	57,6716
α°	Gumbel	0,879	-0,5366	44,914	51,1
$P_H(kN)$	Lognormal	1,005	0,2156	9,2501	9,203
$P_V(kN)$	Lognormal	0,957	0,0895	1,3248	1,383
$\sigma_{max}(MPa)$				234,89	124,73
$Volume(mm^3)$				2,01e6	2,83e6
β				3,00	
P_f				1×10^{-3}	

Furthermore, we consider that the length dimension L_2 , the section shank dimensions (b and h), the depth dimension L_4 and the angle parameter α follow respectively the normal, uniform, Weibull and Gumbel distributions. The sensitivity analysis presented in Table 4 shows that the geometry parameters have a bigger influence than the loading parameters.

Conclusions

In this paper, we develop an efficient methodology that can lead to optimum designs under uncertainties. Here, the developed method controls the structural reliability levels for complex studies. The basic idea of the developed strategy is to find structural sensitivity values with object of determining the influence of each random parameter. An efficient application on the chisel shank plough under the uncertainties on the soil tillage forces is detailed. Here, the tillage forces are calculated in accordance with analytical model of McKyes and Ali. The distributions of soil-tool forces are established to design soil tillage equipments such as shank chisel plough in collaboration with Cranfield University [10]. The advantage of the RBDO using OSF is to define the best compromise between cost and safety. Furthermore, we show that the classical design considering the uncertainty on the loading parameter may not lead to economic or reliable structures.

References

1. Arora, J.S. Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill, New York, NY, 1989.
2. Haftaka, R.T., Gurdal, Z. Elements of Structural Optimization. Kluwer Academic Publications, Dordrecht, Netherlands, 1991.
3. McKyes, E., Ali, O.S. The Cutting of Soil by Narrow Blades. Journal of Terramechanics, 1977, vol. 14, no. 2, pp. 43-58.
4. Mouazen, A.M. and Nemenyi, M. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. Soil & Tillage Research, 1999, no. 51, pp. 1-15.
5. Hasofer, A.M., Lind, N.C. An exact and invariant first order reliability format. J. Eng. Mech, ASCE, EM1, 1974, no. 100, pp. 111-121.
6. Lemaire, M. Fiabilité des structures. Paris, Hermes- Lavoisier, 2005, p. 506.
7. Feng, Y.S., Moses, F. A method of structural optimization based on structural system reliability study of numerical methods. J. Struct. Mech., 1986, no. 14, pp. 437-453.
8. Kharmanda, G. Numerical and semi-numerical methods for reliability-based design optimization. Structural Design Optimization Considering Uncertainties. Taylor & Francis, 2008.
9. Aoues, Y., Chateauneuf, A. Benchmark study of numerical methods for reliability-based design optimization. Journal of Struct. Multidisc. Optim, 2010, vol. 41, no. 2, pp. 277-294.

10. Kharmanda, G., Antypas, I., Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design. Vestnik of DSTU, 2015, no. 15(2), pp. 22-35.

Библиографический список

1. Arora, J.S. Introduction to Optimum Design / J.S. Arora // McGraw-Hill, New York, NY. — 1989.
2. Haftaka, R.T. Elements of Structural Optimization / R.T. Haftaka, Z. Gurdal // Kluwer Academic Publications, Dordrecht, Netherlands. — 1991.
3. McKyes, E. The Cutting of Soil by Narrow Blades / E. McKyes, O.S. Ali // Journal of Terramechanics. — 1977. — Vol. 14, № 2. — P. 43-58.
4. Mouazen, A.M. Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil / A.M. Mouazen and M. Nemenyi // Soil & Tillage Research. — 1999. — № 51. — P. 1-15.
5. Hasofer, A.M. An exact and invariant first order reliability format / A.M. Hasofer, N.C. Lind // J. Eng. Mech, ASCE, EM1. — 1974. — № 100. — P. 111-121.
6. Lemaire, M. Fiabilité des structures / M. Lemaire // Paris, Hermes- Lavoisier. — 2005. — P. 506.
7. Feng, Y.S. A method of structural optimization based on structural system reliability study of numerical methods / Y.S. Feng, F. Moses // J. Struct. Mech. — 1986. — № 14. — P. 437-453.
8. Kharmanda, G. Numerical and semi-numerical methods for reliability-based design optimization / G. Kharmanda // Structural Design Optimization Considering Uncertainties / Taylor & Francis. — 2008.
9. Aoues, Y. Benchmark study of numerical methods for reliability-based design optimization / Y. Aoues, A. Chateaneuf // Journal of Struct. Multidisc. Optim. — 2010. — Vol. 41, № 2, — P. 277-294.
10. Kharmanda, G. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design / G. Kharmanda, I. Antypas // Vestnik of DSTU. — 2015, № 15(2). — P. 22-35.

Поступила в редакцию 28.12.2015

Сдана в редакцию 28.12.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 621.86.067.2

DOI 10.12737/19689

Исследование влияния параметром электрического питания на производительность вибрационного дозатора с электромагнитным приводом*

Т. И. Тупольских¹, Н. В. Гучева^{2}**^{1,2} Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Investigation of power supply parameter effect on performance of vibrator meter with magnetic actuator***

T. I. Tupolskikh¹, N.V. Gucheva^{2}**^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является изучение изменения точности дозирования вибрационного дозатора с электромагнитным приводом при питании от промышленной электрической сети. Используются ранее полученные авторами результаты зависимости производительности вибрационного дозатора от частоты, амплитуды и направления колебаний электромагнитного привода и свойств дозируемого материала. Эти зависимости были получены на экспериментальной установке со стабилизированными параметрами электропитания. Установлено, что питание вибрационного побудителя от промышленной электрической сети существенным образом (до 5%) влияет на отклонение производительности вибрационного дозатора от заданной, что может стать недопустимым при дозировании ингредиентов, требующих более высокой точности. Для устранения неконтролируемых отклонений производительности дозатора от случайных изменений напряжения и частоты необходимо использовать стабилизированный по напряжению и частоте источник питания электромагнитного побудителя колебаний.

Ключевые слова: дозирование, вибрационный дозатор, электромагнитный привод, электрическая сеть, точность дозирования.

The work objective is to study dosing accuracy changes of the vibration measurer with an electromagnetic drive powered by the industrial network. The previously obtained dependences of the vibration measurer performance on the vibration frequency, amplitude and direction of the magnetic actuator, and on the properties of the dispensed material are used. These relationships are obtained at the pilot plant with the stabilized power settings. It is found that the supply from the vibration agitator of the industrial network significantly (up to 5%) affects the vibrator meter performance deviation from the given one that may become unacceptable when dispensing the ingredients requiring higher accuracy. To eliminate uncontrolled deviations of the dispenser performance from the stochastic variations of voltage and frequency, a voltage- and frequency-stabilized supply of the vibration activator electromagnet should be used.

Keywords: dispensing, vibration measurer, magnetic actuator, power network, metering accuracy.

Введение. Результаты расчета убытков, причиняемых ежегодно экономике США перерывами в подаче напряжения и отклонениями параметров качества электроэнергии, показали, что экономика страны теряет от 104 до 164 млрд долларов. Если допустить, что ущерб от качества электроэнергии в России примерно такой же, то теоретически можно предположить потери порядка 37 млрд долларов ежегодно (по уровню цен 2012 г) [1, 2]. Весьма значителен ущерб от нарушения качества электроснабжения особенно в отраслях непрерывного цикла. К таким производствам относится и комбикормовая промышленность с процессом дозирования тонких ингредиентов. Изменение напряжения (разнопеременное, одиночное, быстрое, случайное прерывание, провал и перенапряжение), частоты напряжения влияют на привод дозатора, что ведет к нарушению точности дозирования и качества комбикор-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: tupolskix@mail.ru, ngucheva@gmail.com

***The research is done within the frame of the independent R&D.

мов иногда до недопустимых пределов. Поэтому исследование влияния качества электропитания вибрационного дозатора является весьма актуальным.

В работах [3, 4] представлены результаты исследований вибрационного дозатора. Вибрационный дозатор состоял из вибрационного лотка и бункера, которые имели гибкую связь между собой и подвергались вибрационному воздействию от единого источника колебаний. Источником колебаний был электромагнит, питание которого осуществлялось от генератора низкочастотных колебаний. Тяговая сила электромагнита зависела от величины тока в обмотке и частоты питающего напряжения. Дозатор находился в цехе при постоянных значениях температуры и влажности и дозировал модельный материал. На рис. 1 представлено отклонение производительности дозатора от среднего значения в зависимости от времени суток при непрерывной работе.

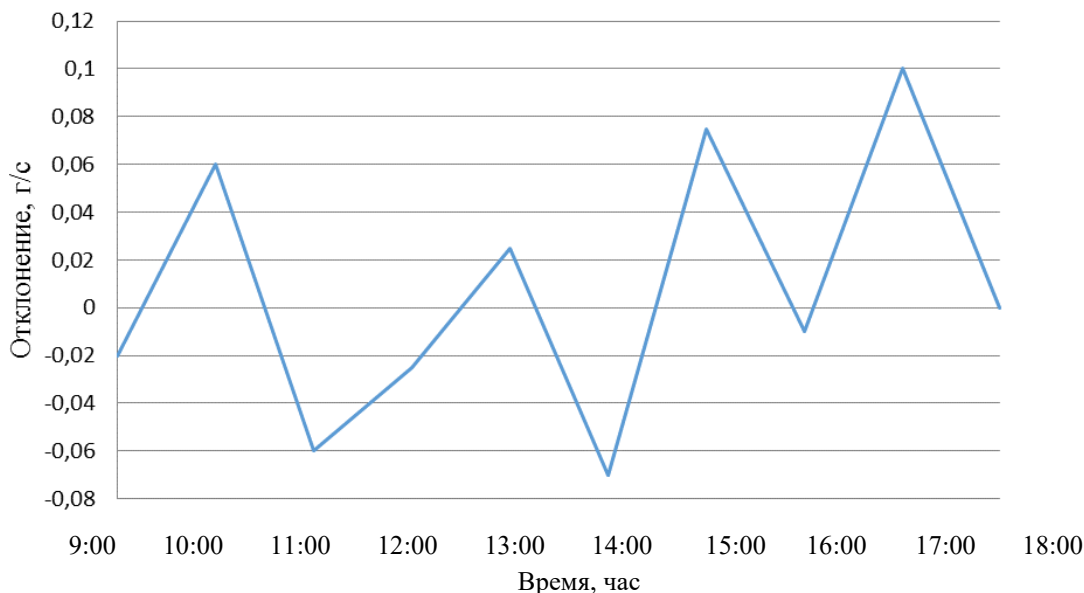


Рис. 1. Отклонение производительности дозатора от среднего значения $q = 9,92$ г/с при частоте колебаний $\omega = 314,15$ с⁻¹ от времени суток

Одними из факторов отклонения являются флуктуации частоты и напряжения в питающей электрической сети. Значительные отклонения наблюдались после 15.00 часов, когда в сети наибольшие нагрузки, падение напряжения и изменение частоты.

В работах [3,4] производительность вибрационного бункера и вибрационного лотка определялась по формуле:

$$q_r = 0,375 A^2 (A \omega \cos \beta) \left(\frac{g \cos(\phi - \alpha)}{A \omega^2 \sin \beta \cos \phi} \right)^{-0,2} \left(\frac{S}{A^2} \right)^{1,08} \sin^{0,16} \beta \cos^{0,76} \beta, \quad (1)$$

где A — амплитуда колебаний, м; ω — круговая частота колебаний, с⁻¹; β — угол направления колебаний, град; α — угол наклона к горизонту дна лотка, град; ϕ — угол трения продукта о материал дна лотка, град; S — площадь выпускного отверстия в бункере, м².

Зависимость (1) получена для дозируемого материала с эквивалентным диаметром частиц $d_{э\kappa\text{в}} = 2,75 \cdot 10^{-3}$ м.

Если все параметры, входящие в выражение для производительности лотка постоянные величины, то вычисленная производительность будет совпадать с реальной производительностью лотка. Постоянные параметры — это угол положения лотка к горизонту α , угол направления колебаний β , площадь S выпускного отверстия в бункере. Для партии дозируемого материала угол трения ϕ продукта о материал можно принять постоянным.

В выражение (1) входят два параметра, представляющие собой случайные величины — частота колебаний ω и амплитуда колебаний A .

В производственных условиях электромагнит, приводящий систему в колебательное движение, питается обычно от промышленной электрической сети, в которой частота и напряжение не являются постоянными величинами.

Допустимые и предельные значения частоты и напряжения регламентируются в Российской Федерации ГОСТ 32144–2013 и ГОСТ 29322–92, в которых требования к напряжению согласованы с МЭК 38–83; в Европейском союзе — ИЕС (МЭК) [5, 6]; в США — NIST (Национальным институтом стандартов и технологий) [7]. В таблице 1 представлены параметры электросетей.

Таблица 1

Стандарты напряжений в разных странах [8]

Страна	Напряжение, В	Частота, Гц
Россия	220±10% (230...240 фактически)	50 ±0,2
Франция (ЕС)	230±10%	50
США	120± 5%(114...126 фактически)	60

Для частоты сети f_c по ГОСТ 13109–97 [9] определено:

$$f_c = 50 \pm 0,2 \text{ Гц}$$

На рис. 2 показано изменение частоты питающего напряжения в Объединенной энергетической системе Республики Беларусь [10].

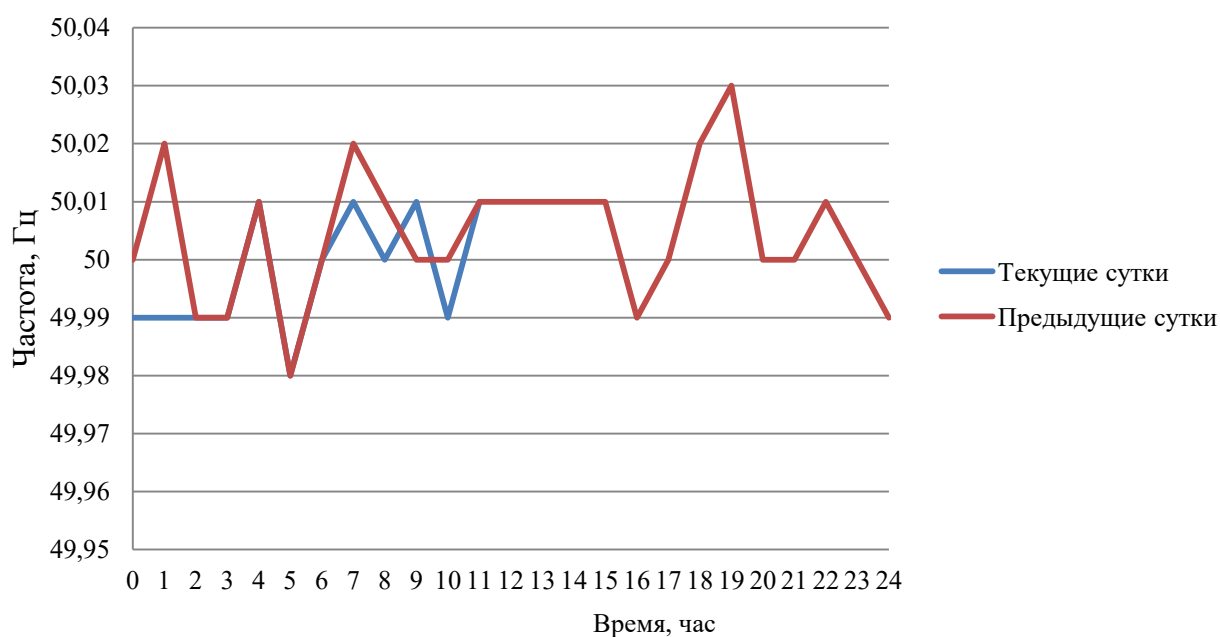


Рис. 2. Изменение частоты питающего напряжения
Объединенной энергетической системы Республики Беларусь

Из графика следует, что частота сети является величиной переменной и случайной.

Для определения влияния изменения параметров питающей сети на точность дозирования необходимо знать статистические характеристики этого случайного процесса. Поскольку в доступных информационных источниках таких данных нет, то статистические характеристики случайных изменений напряжения и частоты сети определялись из нижеизложенных соображений.

Среднее значение частоты $\bar{f} = 50 \text{ Гц}$. Можно считать, что случайные изменения частоты подчиняются нормальному закону распределения. Тогда среднеквадратичное значение $\sigma_f = 0,067$ при доверительной вероятности $P = 0,95$. Выбор доверительной вероятности определили по точности приборов измерения частоты, которая рекомендуется указанным стандартом. Она составила 0,4%.

Для напряжения сети допустимые значения $U_c = 220 \pm 22 \text{ В}$.

Среднее значение напряжения $\bar{U} = 220 \text{ В}$. Можно допустить, что случайные изменения напряжения подчиняются закону нормального распределения. Тогда среднеквадратичное значение распределения $\sigma_u = 7,33 \text{ В}$ при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Согласно ГОСТ 32144–2013, в течение не менее 95 % времени каждых суток фазное напряжение и частота должны находиться в указанном диапазоне, а коэффициент несинусоидальности не должен превышать 5 %.

Остальные 5 % или менее времени каждых суток напряжение может изменяться от 198 до 242 В (отклонение 10 %), частота от 49,6 до 50,4 Гц, а коэффициент несинусоидальности должен быть не более 10 %. Допускаются также более сильные изменения частоты — от 49,5 до 51,0 Гц, но общая длительность таких изменений не должна превышать 90 часов за год.

Промышленная частота питающего напряжения не влияет на тяговую силу электромагнита, от которой зависит амплитуда колебаний системы дозирования. Тяговая сила магнита зависит от активной составляющей тока, протекающего по виткам катушки электромагнита. Активная составляющая тока через катушку электромагнита прямо пропорциональна напряжению питания по закону Ома. Поэтому допускаем, что случайные изменения питающего напряжения линейно влияют на амплитуду колебаний системы (рис. 3). Изменения амплитуды колебаний подчиняются закону нормального распределения [11].

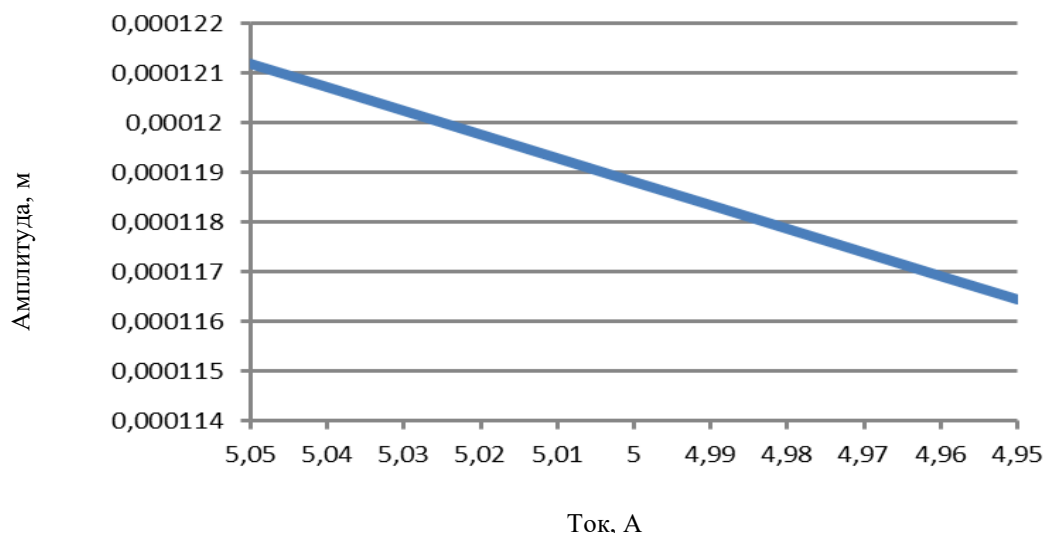


Рис. 3. Изменение амплитуды колебаний в зависимости от тока электромагнита.
Номинальный ток 5 А

Исследуем случай работы вибрационного дозатора при ускорении колебаний $\alpha = 12 \text{ м} / \text{с}^2$. Тогда среднее значение амплитуды колебаний при частоте колебаний $f_a = 314,15 \text{ с}^{-1}$ будет $\bar{A} = 0,000122 \text{ м}$. Расчеты тяговой силы электромагнита показали, что при доверительной вероятности $P = 0,95$ и нормальном законе распределения среднеквадратическое значение параметра распределения значений амплитуды $\sigma_a = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Размах амплитуды составил $A = 1,22 \cdot 10^{-4} \pm 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Поскольку вибрационный лоток является конечным рабочим органом в системе, то он и определяет производительность и точность дозирования.

Определим зависимость изменения амплитуды колебаний от изменения напряжения сети и частоты колебаний на девиацию производительности лотка и на точность дозирования.

В производственных условиях устанавливаются параметры вибрации, толщина слоя, а физические свойства материала принимаются постоянными для партии дозируемого материала и после этого прогнозируется производительность дозатора. При дозировании другой партии материала при тех же параметрах дозатора учитываются физические свойства материала партии изменением, например, ускорения колебаний.

Для решения поставленной задачи воспользуемся теорией ошибок [11]. Теория ошибок не исследует систематические ошибки, а рассматривает только случайные ошибки. Случайные ошибки могут иметь различные законы распределения. Однако практически в подавляющем большинстве случаев принимается, что случайная ошибка распределена по нормальному закону [11].

В соответствии с постулатом Гаусса, наиболее вероятным значением искомой величины является среднее арифметическое значение наблюдаемых значений. Если случайные ошибки удовлетворяют постулату Гаусса, то законом распределения случайных ошибок является нормальный закон [11].

В случае вибрационного дозирования под ошибкой дозирования понималось отклонение текущего значения производительности от расчетного. Причиной ошибки дозирования являлось случайное изменение напряжения и частоты промышленной электрической сети, определяемые нормальными законами распределения изменения этих величин.

Если производительность дозатора определяется функцией (1), то ее можно представить в виде: $q_r = f(A, \omega, \alpha, \beta, \phi, S)$. Принято, что в процессе дозирования α, β, ϕ, S остаются постоянными. Случайные величины

A, ω и их наивероятнейшие значения $\bar{A}, \bar{\omega}$, а σ_ω, σ_A — соответствующие среднеквадратические ошибки при нормальном законе распределения этих величин. Отсюда следует, что наиболее вероятным значением q_r является:

$$q_r = f(\bar{A}, \bar{\omega}, \alpha, \beta, \phi, S)$$

По теории ошибок, при принятых допущениях среднеквадратическая ошибка девиации производительности:

$$\sigma_q = \sqrt{\left(\frac{\partial q_r}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial \omega}\right)^2 \sigma_\omega^2} \quad (2)$$

Частные производные производительности вибрационного дозатора по амплитуде и частоте колебаний:

$$\frac{\partial q_r}{\partial A} = 1,04 A^{0,04} (N) \quad \frac{\partial q_r}{\partial \omega} = 0,6 \omega^{-0,04} (N_1),$$

где

$$N = 0,375 \omega \cos \beta \left(\frac{g \cos(\phi - \alpha)}{\omega^2 \sin \beta \cos \phi} \right)^{-0,2} S^{1,08} \sin^{0,16} \beta \cos^{0,76} \beta$$

$$N_1 = 0,375 A^2 (A \cos \beta) \left(\frac{g \cos(\phi - \alpha)}{A \sin \beta \cos \phi} \right)^{-0,2} \left(\frac{S}{A^2} \right)^{1,08} \sin^{0,16} \beta \cos^{0,76} \beta,$$

Для случая, когда:

$$\bar{A} = 0,000122 \text{ м}, \quad \sigma_A = 2,00 E - 06 \text{ м},$$

$$\bar{\omega} = 314,15 \text{ с}^{-1} \quad \sigma_\omega = 6,70 E - 02 \text{ с}^{-1},$$

$$\alpha = 0^\circ \quad \beta = 20^\circ \quad \phi = 20^\circ \quad S = 0,012 \text{ м}^2$$

Вычисляя q_r из выражения (1) и σ_q из выражения (2) получаем:

$$q_r = 2,70 E - 05 \text{ м}^3 / \text{с} \quad \sigma_q = 4,61 E - 07 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

При доверительной вероятности $P = 0,95$ производительность вибрационного дозатора будет находиться в диапазоне:

$$q_r = 2,70 E - 05^{+0,138 E - 05}_{-0,138 E - 05} \text{ м}^3 / \text{с}$$

Экспериментальное значение производительности вибрационного питателя при таких параметрах составило — $q_r = 3,10 E - 05 \text{ м}^3 / \text{с}$ [4].

В случае, когда электромагнитный привод вибрационного дозатора используется в электрической сети с другой частотой питания, например, 60 Гц ($\omega = 376,98 \text{ с}^{-1}$) производительность дозатора увеличивается. В соответствие с (2) увеличивается и девиация производительности.

Выводы. Изменение напряжения и частоты питания вибрационного побудителя существенным образом (до 5%) влияет на производительность вибрационного дозатора. Для устранения неконтролируемых изменений производительности дозатора от случайных изменений напряжения и частоты источника питания необходимо стабилизированное питание по напряжению и частоте электромагнита побудителя колебаний. При питании от промышленной электрической сети необходима система управления производительностью дозатора.

Библиографический список

1. Денисов, В. И. Основы рыночных отношений в электроэнергетике / В. И. Денисов, А. А. Дзюба // Электрические станции. — 2003. — №8. — С.13–18.
2. Бровкина, Ю. Как много теряет экономика на качестве электроэнергии? / Ю. Бровкина // ЭнергоРынок. — 2013. — № 10. — С.37–39.
3. Тупольских, Т. И. Производительность вибрационного лотка дозатора и параметры вибрирования / Т. И. Тупольских // Донской гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону. — 2000, 6 с.; 5 библ. — Рус. Деп. в ВИНТИ, 09.02.00 №300-B00.
4. Тупольских, Т. И. Исследование технологического процесса работы вибрационного питателя с бункером / Т. И. Тупольских, В. Д. Ильченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2001. — Т.1, №3(9). — С. 56–65.
5. Международные стандарты и оценка соответствия для всех электрических, электронных и смежных технологий [Электронный ресурс] / Международная Энергетическая Комиссия. — Режим доступа : <http://www.iec.ch/dyn/www/f> (дата обращения : 07.11.2015).

6. ГОСТ Р 50571–4–44–2011 (МЭК 60364–4–44:2007). Электроустановки низковольтные. Часть 4–44. Требования по обеспечению безопасности. Защита от отклонений напряжения и электромагнитных помех. — Введ. 2012–07–01. — Москва : Стандартинформ, 2012. — 48 с.
7. Allan C. Beller. Global Quality Manager and Six Sigma Champion/ EKC Technology DuPont Electronics and Communications. 2520 BarringtonCourtHayward, CA 94545.
8. Electric current abroad. U.S. Department of Commerce International Trade Administration, February 2002.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014–07–01. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 19 с.
10. Оперативная работа в электроэнергетике / Энергодиспетчер. — Режим доступа : <http://www.operby.com> (дата обращения: 09.11.2015).
11. Гутер, Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. — Москва : Физматгиз, 1962. — 356 с.

References

1. Denisov, V.I., Dzyuba, A.A. Osnovy rynochnykh otnosheniy v elektroenergetike. [Basics of market relations in the power industry.] Power Technology and Engineering, 2003, no. 8, pp. 13–18 (in Russian).
2. Brovkina, Y. Kak mnogo teryaet ekonomika na kachestve elektroenergii? [How much does economy lose on power quality?] EnergoRynok, 2013, no. 10, pp. 37–39 (in Russian).
3. Tupolskikh, T.I. Proizvoditel'nost' vibratsionnogo lotka dozatora i parametry vibrirovaniya. [Performance of dispenser vibrating chute and vibration parameters.] Don State Technical University, Rostov-on-Don, 2000, 6 p.; VINITI, Russ.Dep., 09.02.00 №300-B00 (in Russian).
4. Tupolskikh, T.I., Ilchenko, V.D. Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa raboty vibratsionnogo pitatelya s bunkerom. [Study on the process of the vibration hopper-feeder operation.] Vestnik of DSTU, 2001, vol. 1, no. 3(9), pp. 56–65 (in Russian).
5. Mezhdunarodnye standarty i otsenka sootvetstviya dlya vsekh elektricheskikh, elektronnykh i smezhnykh tekhnologiy. [International Standards and Conformity Assessment for all electrical, electronic and related technologies.] International Energy Commission. Available at: <http://www.iec.ch/dyn/www/f> (accessed: 07.11.2015) (in Russian).
6. GOST R 50571–4–44–2011 (MEK 60364–4–44:2007). Elektroustanovki nizkovol'tnyye. Chast' 4–44. Trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti. Zashchita ot otkloneniy napryazheniya i elektromagnitnykh pomekh. — Vved. 2012–07–01. [GOST R 50571-4-44-2011 (MEK 60364-4-44:2007). Low-voltage electrical installations. Part 4-44. Safety requirements. Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances. Intr. 2012–07–01.] Moscow: Standartinform, 2012, 48 p. (in Russian).
7. Allan C. Beller. Global Quality Manager and Six Sigma Champion. EKC Technology DuPont Electronics and Communications. 2520 BarringtonCourtHayward, CA 94545.
8. Electric current abroad. U.S. Department of Commerce International Trade Administration, February 2002.
9. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. — Vved. 2014–07–01. [GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Intr. 2014–07–01.] Moscow: Standartinform, 2014, 19 p. (in Russian).
10. Operativnaya rabota v elektroenergetike. [Operational work in the power industry.] Power dispatcher. Available at: <http://www.operby.com> (accessed: 09.11.2015) (in Russian).
11. Guter, R.S., Ovchinskiy, B.V. Elementy chislennogo analiza i matematicheskoy obrabotki rezul'tatov opyta. [Elements of numerical analysis and mathematical processing of the experimental results.] Moscow: Fizmatgiz, 1962, 356 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.01.2016

Сдана в редакцию 12.01.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 636.085.55:636.085.68:675.92.027.3

DOI 10.12737/19684

Исследования процесса экструдирования смеси зерновых концентратов с измельченной зеленой массой бобовых трав*

В. И. Пахомов¹, С. В. Брагинетц², А. С. Алфёров³, М. В. Гайдаш⁴, Ю. В. Степанова^{5**}^{1,5} Донской государственный технический университет. г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация^{1,2,3,4} Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, г. Зерноград Ростовской области, Российская Федерация

Study on extruding process of grain concentrate mixture with chopped green mass of legumes***

V. I. Pakhomov¹, S. V. Braginetz², A. S. Alferov³, M. V. Gaydash⁴, Y. V. Stepanova^{5**}^{1,5} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation^{1,2,3,4} North Caucasian Research Institute of Agricultural Engineering and Electrification of Agriculture, Zernograd, Rostov region, Russian Federation

Целью данной работы является исследование перспективного способа повышения питательной ценности комбикормов путем совместного экструдирования зерновых смесей с измельченной растительной массой бобовых трав, отличающихся повышенным содержанием витаминов и белков. Задача исследования — экспериментальное определение рациональных параметров и режимов работы оборудования для процесса экструдирования. Использовались типовые методы исследования процесса экструдирования, при которых изменялись свойства сырья и режимы работы экструдера ЭК-75 (75 кг/ч): влажность экструдруемой смеси, массовая доля измельченной зелени в смеси и частота вращения шнека экструдера при различной величине подачи смеси. В качестве основного маркера процесса использовалось остаточное содержание β-каротина как достаточно ценного, но нестойкого компонента получаемого продукта. Ограничительными условиями являлись органолептические свойства продукта, влажность после остывания, наличие неразрушенного зернового материала. Энергоэффективность процесса оценивалась критериями удельных энергозатрат. В результате исследования процесса экструдирования определены его оптимальные характеристики: подача смеси — 60 кг/ч; температура смеси на выходе из матрицы — 120–125 °С; содержание измельченной зеленой массы в смеси — 14–15 %; частота вращения шнека — 220–240 мин⁻¹ при удельных энергозатратах 90–95 кВт·ч/т.

The work objective is to study an advanced way of enhancing the nutritive value of the mixed feed by co-extrusion of the grain mixtures with chopped green legumes that differ in high content of vitamins and protein. The task of this investigation is an experimental determination of rational parameters and operating modes of the equipment for the extrusion process. Standard techniques are used to study the extrusion process when the properties of raw materials and modes of the extruder EC-75 (75kg/hr) change: extrudable mixture humidity, weight percentage of the chopped green mass in the mixture, and the extruder screw frequency of rotation at different feed rate of the mixture. The residual content of β-carotene as a quite valuable but impermanent component of the received product is used as a key marker of the process. The restrictive conditions are organoleptical properties of the product, humidity after cooling, and occurrence of the undistorted grain material. Energy efficiency of the process is evaluated by the criteria of the specific energy consumption. The study results of the extrusion process are as follows. Its optimal characteristics are determined: mixture supply is 60 kg / hr, mixture temperature at the matrix outlet is 120-125°C, content of the chopped green mass in the mixture is 14-15%, screw rate speed is 220-240 rpm with the specific energy consumption of 90-95 kW hr/t.

Ключевые слова: экструдирование, пресс-экструдер, комбикорм, каротин, зеленая масса, бобовые травы, энергоэффективность.

Keywords: extrusion, extruder, combined feed, carotene, green mass, leguminous plants, energy efficiency.

*Работа выполнена по теме № 0708-2014 — 0009 в рамках выполнения Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. в части НИР.

**E-mail: vniptim@gmail.com, sbraginetz@mail.ru, alfa-8303@yandex.ru, gaydash-m@mail.ru, julija_stepanova@ro.ru

*** The research is done on theme no. 0708-2014 — 0009 within the frame of the Program of fundamental scientific research of National Academy of Sciences for 2013–2020 in R&D.

Введение. Эффективность использования кормов является основным фактором конкурентоспособности отечественной животноводческой продукции на внутреннем и мировом рынках [1]. Имея переизбыток зерновых кормов, сельхозтоваропроизводители уделяют недостаточно внимания их рациональному применению. Из-за несбалансированности рационов и недостаточной предварительной подготовки кормовых компонентов до 50 % питательных веществ может не усваиваться организмом животного. При этом отмечается наиболее выраженная нехватка в рационах животных и птицы незаменимых аминокислот и витаминов [2].

Одним из перспективных направлений повышения качества и питательной ценности комбикормов является введение в их состав новых доступных и недорогих видов растительного сырья, содержащих сбалансированный комплекс белков, липидов, органических кислот, минеральных веществ, витаминов [3, 4]. Таким доступным и недорогим видом сырья являются травы, наиболее предпочтительны бобовые.

Технологический процесс производства кормов предполагает, что часть зернового сырья в целом или измельченном виде смешивается с измельченной зеленой массой бобовых трав. Полученная смесь экструдирована, подвергаясь при этом кратковременному, но очень интенсивному механическому и баротермическому воздействию. За счет высокой температуры (110–160 °C), давления (2–4 МПа) и сдвиговых усилий в винтовых рабочих органах пресс-экструдера меняется структурно-механический и химический состав исходной смеси [5, 6]. В полученном экструдированном корме в достаточной мере сохраняются витамины и биологически активные вещества, в том числе каротин, а бактерии и микроскопические плесневые грибы в подавляющем большинстве уничтожаются. Кроме того, происходит частичная декстринизация крахмала зернового сырья [7].

Задачей исследований являлось экспериментальное определение рациональных параметров и режимов работы оборудования в процессе экструдирования зерновой смеси с измельченной зеленой массой бобовых трав.

Материалы и методы. Исследования проводились на разработанном и изготовленном экспериментальном образце технологического модуля для экструдирования зернотравяной смеси, включающем одношнековый пресс-экструдер с дополнительным дозатором зеленой массы.

В качестве зерновой основы в эксперименте использовалась зернобобовая смесь урожая 2014 года (пшеница, ячмень, кукуруза, горох в соотношении 4:3:2:1), по совокупной твердости компонентов соответствующая большинству рационов для свиней и птицы, исходной влажностью $W = 9,6 \dots 11,2$ %, с содержанием каротина менее 0,2 %.

Травяная составляющая представляла собой предварительно измельченную вегетативную массу люцерны первого укоса, заготовленную в стадии бутонизации, влажностью 75–80 %, с содержанием каротина 220 мг/кг. Размер фракции травяной резки не превышал 10 мм.

При необходимости зерновые ингредиенты комбикорма измельчались в молотковой дробилке с вертикальным валом ротора ВД-1.

Из факторов, оказывающих влияние на технологический процесс экструдирования, были отобраны основные:

- частота вращения шнека, мин⁻¹;
- влажность экструдированной смеси, %;
- температура готового продукта на выходе из матрицы, °C;
- содержание травяной резки в смеси (по массе), %;
- величина подачи смеси, кг/ч.

Остальные факторы находятся в прямой зависимости от них либо не оказывают существенного влияния на рассматриваемый процесс.

Для оценки эффективности процесса экструдирования кормов выбрано два критерия: содержание каротина в экструдате и энергоемкость.

К факторам, от которых зависит режим работы пресс-экструдера, отнесено содержание зеленой массы бобовых трав в смеси, так как включение этого вида сырья с начальной влажностью 40–70 % в смесь в количестве 10–20 % обеспечивает средневзвешенное содержание массовой доли влаги в получаемом корме в пределах рекомендованной, т. е. 16–27 % [8].

Содержание каротина (в мг/кг сухого веса) рассчитывали согласно ГОСТ 13496.17-95 фотометрическим методом. Сущность метода состоит в растворении каротина в петролейном эфире и фотометрическом измерении окраски, интенсивность которой зависит от содержания каротина. Влажность экспериментального материала определяли высушиванием при $t (105 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ по ГОСТ 27548-97.

Экспериментальные исследования. Результаты проведенных исследований показали, что при влажности исходной смеси 18–21 % получается экструдат влажностью до 14,5%, не требующий дальнейшей сушки. В течение всей серии опытов производительность пресс-экструдера составляла 50–70 кг/ч при удельной энергоемкости процесса 85–100 кВт·ч/т.

Подача исходной смеси практически не влияет на содержание каротина в экструдате, а удельная энергоемкость процесса экструдирования увеличивается при повышении подачи на 40–46 %. При этом качество получаемого экструдата

снижается, он становится более рыхлым и имеет повышенную влажность (20–22 %) (рис. 1).

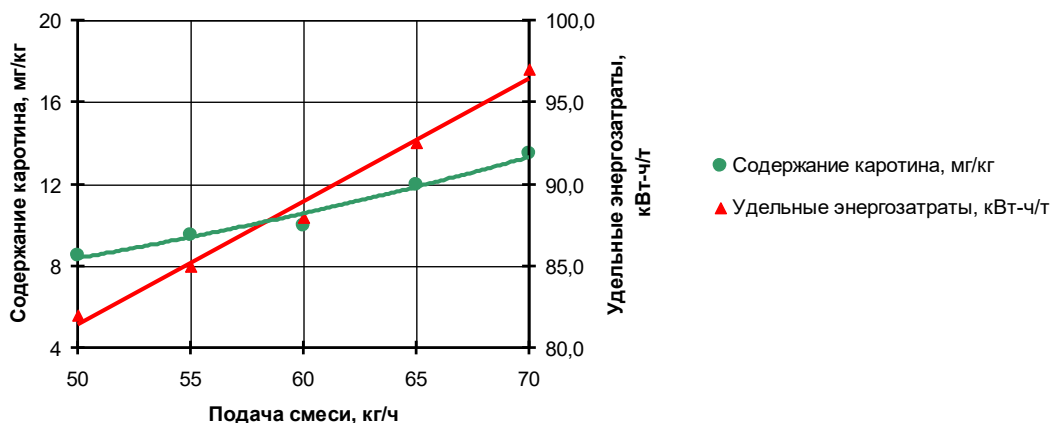


Рис. 1. Влияние подачи исходной смеси на содержание каротина в экструдате и энергоемкость процесса экструдирования

В ходе дальнейших исследований начальная влажность измельченной зеленой массы варьировалась в пределах 40–70 %, что в свою очередь определяло влажность смеси 12–22 % (рис. 2).

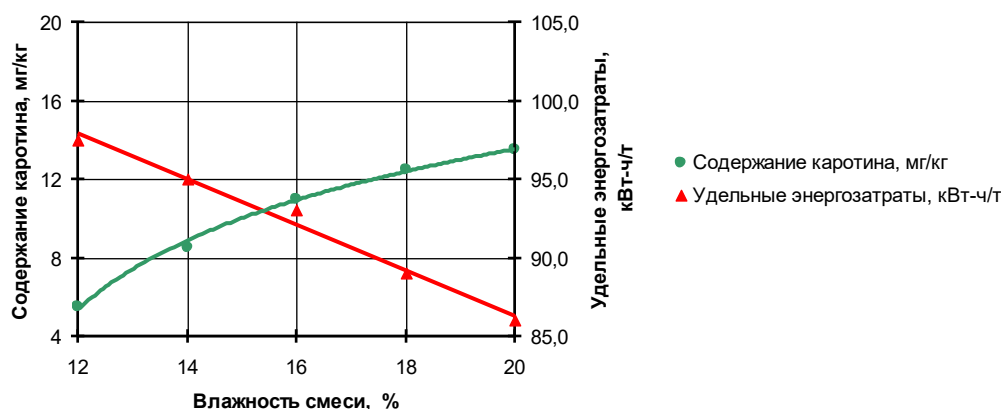


Рис. 2. Влияние влажности смеси на содержание каротина в экструдате и энергоемкость процесса экструдирования

Исходя из результатов проведенного эксперимента можно утверждать, что при подсушивании зеленой массы до влажности 40 % происходит незначительная (4,6–5,4 %) потеря каротина. Но при дальнейшем снижении влажности содержание каротина существенно снижается, поэтому сушить зеленую массу до влажности менее 40 % нецелесообразно. Очевидно, отмеченный эффект можно объяснить следующим образом. Дополнительная влага позволяет снизить длительность и интенсивность экстремального термобараметрического воздействия на химически нестойкий β -каротин.

Доказано, что одним из основных факторов, влияющих на сохранность каротина в экструдате, является исходная влажность зерна и (в большей степени) зеленой массы. При этом экструдат с начальной влажностью зеленой массы 40 % имел конечную влажность 14,8 %, а с начальной влажностью 70 % — не менее 21 %. Следовательно, перед смешиванием с зерносмесью и экструдированием измельченную зеленую массу люцерны необходимо предварительно подсушивать.

Также на сохранность каротина при экструдировании влияет рабочая температура на выходе из фильеры матрицы экструдера, зависящая от различных факторов: диаметра фильеры, объема и скорости подачи смеси, частоты вращения шнека, влажности, содержания зеленой массы в смеси и др. Таким образом, следует определить режимы работы пресс-экструдера, при которых сохранность каротина максимальна и готовый экструдат обладает требуемым качеством [9].

Полученные в результате проведенных исследований данные показали, что качественный экструдат с наибольшим содержанием каротина можно получить при температуре 110–125 °С (рис. 3). Дальнейшее увеличение температуры ведет к резкому снижению содержания каротина в готовом продукте.

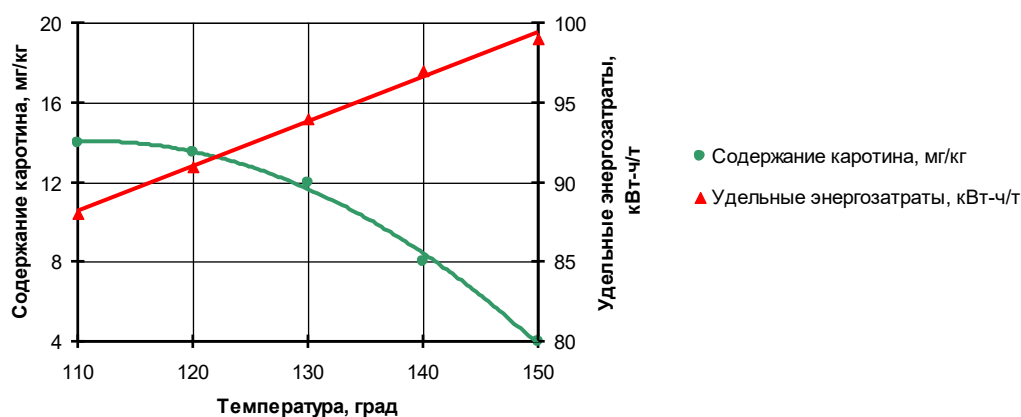


Рис. 3. Влияние температуры смеси на содержание каротина в экструдате и энергоемкость процесса экструдирования

Увеличение содержания зеленой массы в смеси, безусловно, влияет на содержание каротина в экструдате (рис. 4). Но при содержании травяной резки в смеси более 20 % снижается качество получаемого продукта. При этом он имеет повышенную влажность и рыхлость. Поэтому рациональный уровень содержания зеленой массы люцерны в смеси — 15–20 %.

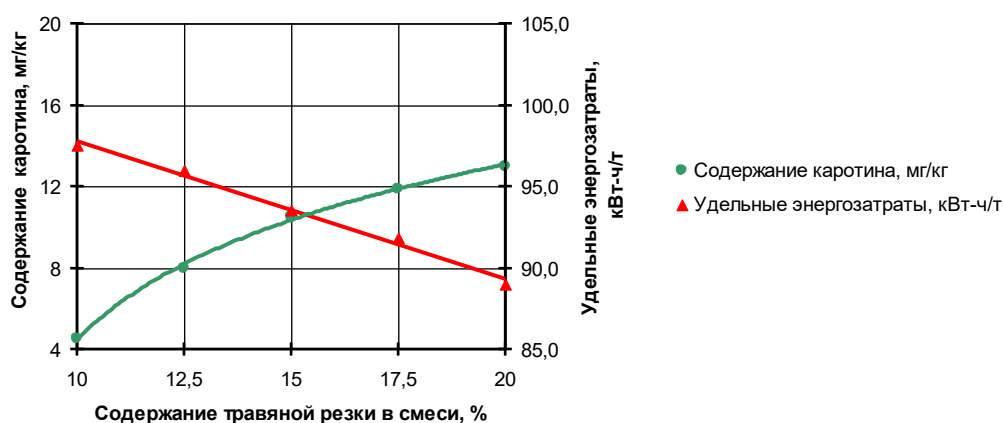


Рис. 4. Влияние содержания травяной резки на содержание каротина в экструдате и энергоемкость процесса экструдирования

Частота вращения шнека пресс-экструдера влияет на температуру экструдата, которая, в свою очередь, влияет на содержание в нем каротина. Увеличение частоты вращения шнека приводит к уменьшению содержания каротина в готовом продукте. Из графика на рис. 5 следует, что рациональная частота вращения шнека пресс-экструдера равна 220–240 мин⁻¹.

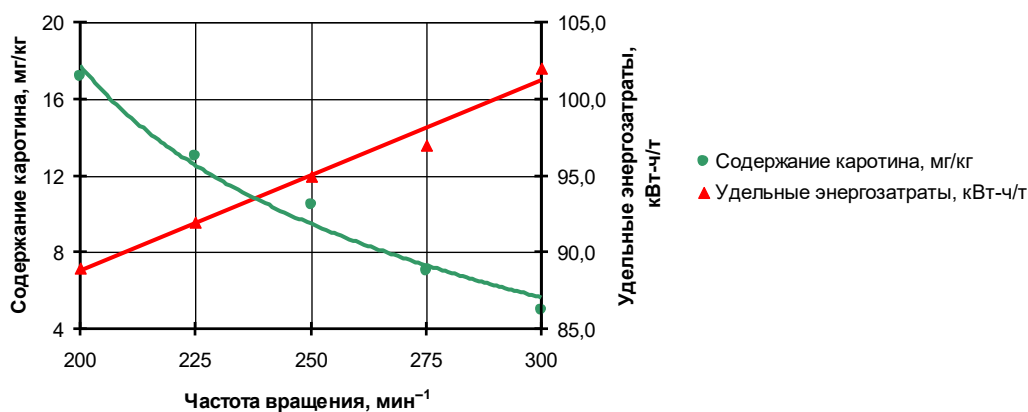


Рис. 5. Влияние частоты вращения шнека пресс-экструдера на содержание каротина в экструдате и энергоемкость процесса экструдирования

Выводы. Рациональными параметрами процесса экструдирования смеси комбикорма с измельченной зеленой массой бобовых трав являются:

- подача экструдруемой смеси — 60 кг/ч;
- температура смеси на выходе из фильеры матрицы экструдера — 120–125 °С;
- содержание измельченной зеленой массы в смеси — 14–15 %;
- частота вращения шнека пресс-экструдера — 220–240 мин⁻¹.

При этом влажность получаемого экструдированного корма не превышает 14,5 % при удельных энергозатратах 90–95 кВт ч/т.

Библиографический список

1. Пахомов, В. И. Оборудование для приготовления полнорационных комбикормов в условиях хозяйств / В. И. Пахомов, А. В. Смоленский, А. С. Алферов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12, № 7 (68). — С. 108–114.
2. Афанасьев, В. А. Разработка и внедрение инновационных технологических и технических решений для комбикормовой промышленности / В. А. Афанасьев // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания. — 2013. — № 1. — С. 39–46.
3. Егоров, Б. В. Экструдированные комбикорма на основе люцерновой резки / Б. В. Егоров, В. В. Гончаренко, Н. В. Хоренжий // Зернові продукти і комбікорми. — 2004. — № 3. — С. 30–34.
4. Ramos Diaz, J.-M. Use of amaranth, quinoa, kañiwa and lupine for the development of gluten-free extruded snacks / J.-M. Ramos Diaz. — Helsinki : Unigrafia, 2015. — P. 134.
5. Михайлусь, Е. А. Реологические характеристики комбикорма с использованием протеиновых зеленых концентратов / Е. А. Михайлусь, Д. В. Рудой, Т. И. Тупольских // Состояние и перспективы развития с/х машиностроения : мат-лы 7-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 17-й междунар. выставки «Интерагромаш-2014». — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 119–121.
6. Технологические и технические решения для производства комбикормов с включением зеленой массы кормовых трав / С. В. Брагинец [и др.] // Вестник Всерос. науч.-исслед. ин-та механизации животноводства. — 2015. — № 4 (20). — С. 25–29.
7. Effects of extrusion of grain and feeding frequency on rumen fermentation, nutrient digestibility, and milk yield and composition in dairy cows / Z. Snabi [et al.] // Journal of Dairy Science. — 1999. — Vol. 82. — P. 1252–1260.
8. Кошаев, А. Г. Фракционирование сока люцерны для получения кормовых добавок / Г. А. Плутахин, О. В. Кошаева // Научный журнал КубГАУ. — 2013. — № 94 (10). — С. 12–15.
9. Цугленок, Н. В. Повышение энергетической эффективности использования технических средств отжатия зеленого сока растений за счет конструктивного совершенствования систем питания / Н. В. Цугленок, В. В. Матюшев, Г. И. Цугленок // Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та. — 2012. — № 20 (5). — С. 6–7.

References

1. Pakhomov, V.I., Smolenskiy, A.V., Alferov, A.S. Oborudovanie dlya prigotovleniya polnoratsionnykh kombikormov v usloviyakh khozyaystv. [Complete feed equipment under intrafarm conditions.] Vestnik of DSTU, 2012, vol. 12, no. 7 (68), pp. 108–114 (in Russian).
2. Afanasyev, V.A. Razrabotka i vnedrenie innovatsionnykh tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh resheniy dlya kombikormovoy promyshlennosti. [Development and implementation of innovative technological and technical solutions for the mixed feed industry.] Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK — produkty zdorovogo pitaniya, 2013, no. 1, pp. 39–46 (in Russian).
3. Yegorov, B.V., Goncharenko, V.V., Khorenzhiy, N.V. Ekstrudirovannye kombikorma na osnove lyutsernovoy rezki. [Extruded fodder based on chopping alfalfa.] Зернові продукти і комбікорми, 2004, no. 3, pp. 30–34 (in Russian).
4. Ramos Diaz, J.-M. Use of amaranth, quinoa, kañiwa and lupine for the development of gluten-free extruded snacks. Helsinki: Unigrafia, 2015, p. 134.
5. Mikhaylus, E.A., Rudoy, D.V., Tupolskikh, T.I. Reologicheskie kharakteristiki kombikorma s ispol'zovaniem proteinovykh zelenykh kontsentrats. [Rheological characteristics of feed with green protein concentrates.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya s/kh mashinostroeniya : mat-ly 7-y mezhhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 17-y mezhhdunar. vystavki «Interagromash-2014». [Current state and development trends of Agricultural Machine Building: Proc. 7th Int. Sci.-Pract. Conf. within 17th Int. Exhibition “Interagromash-2014”.] Rostov-on-Don, 2014, pp. 119–121 (in Russian).
6. Braginets, S.V., et al. Tekhnologicheskie i tekhnicheskie resheniya dlya proizvodstva kombikormov s vklucheniem zelenoy massy kormovykh trav. [The combined feed production with forage grasses green mass inclusion's technological and technical solutions.] Journal of VNIIMZH, 2015, no. 4 (20), pp. 25–29 (in Russian).

7. Snabi, Z., et al. Effects of extrusion of grain and feeding frequency on rumen fermentation, nutrient digestibility, and milk yield and composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 1999, vol. 82, pp. 1252–1260.

8. Koshchaev, A.G., Plutakhin, G.A., Koshchaeva, O.V. Fraktsionirovanie soka lyutserny dlya polucheniya kormovykh dobavok. [Fractionation of lucerne juice to obtain feed additives.] *Scientific Journal of KubSAU*, 2013, no. 94 (10), pp. 12–15 (in Russian).

9. Tsuglenok, N.V., Matyushev, V.V., Tsuglenok, G.I. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti ispol'zovaniya tekhnicheskikh sredstv otzhatiya zelenogo soka rasteniy za schet konstruktivnogo sovershenstvovaniya sistem pitaniya. [Power efficiency increase of the technical facilities use for green plant moisture squeezing by means of power supply system constructive perfection.] *The Bulletin of KrasGAU*, 2012, no. 20 (5), pp. 6–7 (in Russian).

Поступила в редакцию 29.02.2016

Сдана в редакцию 29.02.2016

Запланирована в номер 23.03.2016

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 620.179.17-715.6

DOI 10.12737/19698

Метод мониторинга процесса каталитической очистки сточных вод по параметрам акустической эмиссии*

В. Л. Гапонов¹, Д. М. Кузнецов^{2**}^{1, 2}Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Monitoring technique for catalytic waste treatment by acoustic emission parameters***

V. L. Gaponov¹, D. M. Kuznetsov^{2**}^{1, 2}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование вопросов определения концентрации пероксида водорода. Задача — оценка метрологических аспектов реакции разложения пероксида водорода. Наряду с традиционным перманганатометрическим (аналитическим) способом определения концентрации пероксида водорода рассмотрен достаточно новый метод — акустической эмиссии. Представлена новая методология решения поставленной задачи, разработанная авторами. В ходе исследования установлено, что реакция каталитического разложения пероксида водорода характеризуется ярко выраженным переходным процессом на начальном этапе. Далее суммарное число импульсов равномерно увеличивается, а затем концентрация пероксида водорода постепенно снижается. Предложенный метод мониторинга по параметрам акустической эмиссии демонстрирует высокую информативность и чувствительность. Установлено, что разброс экспериментальных значений, полученных двумя методами, идентичен — 5–6 % от измеренной величины.

Ключевые слова: каталитическая очистка, пероксид водорода, катализатор, разложение пероксида водорода, перманганатометрический способ, метод акустической эмиссии

The work objective is to study issues of determining the hydrogen peroxide concentration. The task is to evaluate metrological aspects of the hydrogen peroxide decomposition. Alongside with a standard permanganatometric (analytical) method of determining the hydrogen peroxide concentration, a fairly new technique of the acoustic emission is considered. A new methodology of the problem solution developed by the authors is presented. The study has found that the hydrogen peroxide catalytic decomposition reaction is characterized by a strongly marked transient process at the initial stage. Further, the total number of pulses uniformly increases, and then the hydrogen peroxide concentration gradually decreases. The proposed method of monitoring the acoustic emission parameters shows high informativity and sensitivity. It is found that the spread in the experimental values obtained by the two methods is identical – 5 - 6% of the measured value.

Keywords: catalytic treatment, hydrogen peroxide, catalyst, decomposition of hydrogen peroxide, permanganatometric method, method of acoustic emission.

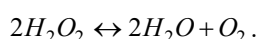
Введение. В настоящее время чрезвычайно актуальной задачей является снижение концентрации вредных веществ в сточных водах [1, 2]. Одним из наиболее эффективных методов признана каталитическая очистка. Реакции каталитического окисления органических соединений практически необратимы и при наличии подходящих катализаторов позволяют преобразовать токсичные вещества в безвредные продукты: углекислый газ и воду. В качестве окислителя используют кислород, озон, пероксид водорода. Растворимость озона и кислорода в воде ограничена. Для ее увеличения применяют повышенное давление, и процесс проводят в автоклавах. Озон является более сильным окислителем, чем кислород. Однако широкому применению озона препятствует его химическая нестойкость. Необходимость получения озона непосредственно перед использованием требует применения специального оборудования —

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: v.gaponov6591@yandex.ru, kuznetsovdm@mail.ru

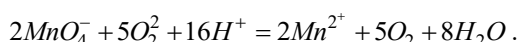
***The research is done within the frame of the independent R&D.

озонаторов, что в целом способствует удорожанию процесса очистки сточных вод. Кроме того, продуктами реакций могут быть озониды, относящиеся к веществам, опасным для здоровья человека. Существенно более высокий окислительный потенциал имеет гидроксид-радикал $\text{OH}\cdot$. Константа скорости реакции с радикалом $\text{OH}\cdot$ по крайней мере в миллион раз больше, чем с озоном, поэтому он оказывается фактически универсальным окислителем для многих веществ. Радикалы $\text{OH}\cdot$ могут образовываться в процессе взаимодействия ионов переходных металлов с пероксидом водорода (процесс Фентона) [2]. Как отмечают авторы работы [1], указанные преимущества технологии очистки сточных вод с помощью пероксида водорода H_2O_2 обусловили постоянное увеличение масштабов его применения, что важно с точки зрения сохранения экологии. По различным оценкам, для охраны окружающей среды используется до 25 % производимого в мире пероксида водорода, и очевидно, что этот показатель будет расти. Окислительный эффект достигается за счет реакции разложения пероксида водорода:



Однако в обычных условиях скорость разложения пероксида водорода невелика, поэтому процесс проводится в присутствии катализатора [3]. Существуют многочисленные катализаторы разложения пероксида водорода, которые используются как в растворах, так и в твердом состоянии. В соответствии с этим катализ разложения пероксида водорода подразделяется на гомогенный и гетерогенный [1].

В работах, описывающих применение гетерогенных катализаторов, представлен механизм процесса, подобный гомогенному катализу [1]. Хотя на самом деле, по-видимому, имеет место гетерогенно-гомогенный радикальный механизм окисления, то есть инициирование процесса — образование гидроксид- и гидропероксид-радикалов происходит на поверхности твердого катализатора, а затем органические вещества окисляются в растворе. Отмеченные таким образом разногласия исследователей позволяют утверждать, что на данный момент отсутствуют достоверные сведения о строении промежуточных соединений рассматриваемой реакции. И несмотря на множество теоретических и экспериментальных исследований, в настоящее время невозможно сделать общие выводы, позволяющие заранее определить механизм реакций пероксида водорода. С целью дальнейшего изучения этого процесса авторы использовали наряду с традиционным перманганатометрическим (аналитическим) способом определения концентрации пероксида водорода [1–3] достаточно новый метод — акустической эмиссии [4–8]. Перманганатометрический метод определения пероксида водорода состоит в окислении его до свободного кислорода, т. е. здесь используются свойства пероксида водорода как восстановителя. Реакция протекает по уравнению



Как показано в работах [1–3], соединения железа, меди и марганца, церия, кобальта, серебра проявляют высокую активность. В данном случае в качестве катализатора использовалось порошкообразное серебро. В качестве носителей для катализаторов обычно используют оксид алюминия, оксид кремния, мезопористые угли и цеолиты, глины.

Методика проведения экспериментов

Перманганатометрический метод. Навеску пероксида водорода берут с таким расчетом, чтобы получить 100 мл приблизительно 0,1 Н раствора. Из уравнения реакции разложения пероксида водорода следует, что грамм-эквивалент пероксида водорода равен половине молекулярного веса — т. е. 17,01. Соответственно, 100 мл 0,1 Н раствора содержат 0,17 г H_2O_2 . Пергидроль содержит около 30 % H_2O_2 , поэтому для анализа нужно отвесить $\approx 0,6$ г препарата. Для навески используют аналитические весы с обычной точностью. Сначала взвешивают пустой бюкс, затем в него наливают около 0,5–0,6 мл пергидроля и снова взвешивают. После этого в бюкс наливают 15–20 мл воды, раствор количественно переносят в мерную колбу емкостью 100 мл, доводят дистиллированной водой до метки и содержимое колбы тщательно перемешивают.

Для определения концентрации пероксида водорода из мерной колбы отбирают пипеткой 20 или 25 мл раствора, переносят раствор в коническую колбу, добавляют к нему 10–15 мл разбавленной (1:4) серной кислоты и со-

держимое колбы титруют (без нагревания) рабочим раствором марганцевокислого калия до появления не исчезающего розового окрашивания. Титрование повторяют еще 1–2 раза. Как обычно, при вычислении принимают во внимание соответствующую часть навески, которая была взята для титрования.

Процентное содержание пероксида водорода вычисляют по формуле

$$\%H_2O_2 = \frac{N_{KMnO_4} \times V_{KMnO_4} \times \mathcal{E}_{H_2O_2}}{g \times 10},$$

где N_{KMnO_4} — нормальность раствора марганцевокислого калия; V_{KMnO_4} — объем раствора марганцевокислого калия, затраченного на титрование, мл; $\mathcal{E}_{H_2O_2}$ — грамм-эквивалент пероксида водорода; g — навеска, г.

Метод акустической эмиссии (АЭ). Из [4–8] известно, что в процессе образования в жидкости газовой фазы схлопывание газовых пузырьков вызывает волны акустической эмиссии. При образовании микроскопического пузырька газа в жидкости происходят процессы разрежения и уплотнения среды, а следовательно, образуются волны напряжения. В случае образования единичного микроскопического пузырька возбуждаемая единичная акустическая волна имеет настолько слабую энергию, что вследствие процессов затухания в жидкой среде ее энергия практически не доходит до поверхности. Но в случае развития процесса и образования достаточно большого количества пузырьков акустический сигнал усиливается, что следует из известных формул акустических расчетов [4–6].

Методика регистрации акустических сигналов подробно описана в ряде работ [5–11]. Индуцируемые сигналы АЭ в процессе разложения пероксида водорода твердотельным катализатором изучались с помощью акустико-эмиссионного комплекса *A-Line 32*. Этот комплекс представляет собой многоканальную систему регистрации АЭ-событий и позволяет проводить параллельно до 8 экспериментов. Частотный диапазон используемых пьезодатчиков составляет 100–500 кГц.

Для усиления индуцируемого АЭ-сигнала выбирают емкость конической формы. В нее заливают 100 мл 10-процентного раствора пероксида водорода. Катализатор (компактный образец серебра) располагают на дне емкости. Для обеспечения сходимости метода эксперимент повторяют несколько раз (1–8), используя один и тот же компактный образец катализатора. Продолжительность каждого эксперимента — 60 мин.

Изучаются следующие параметры АЭ [6].

Активность АЭ N_Σ [имп./с] — производная по времени суммарного счета АЭ. Диапазон изменения $0 \dots 10^{15}$ имп./с. Отчетливо коррелирует с количеством генерируемых в единицу времени газовых пузырьков.

Суммарный счет АЭ N [имп.] — число зарегистрированных превышений импульсами АЭ установленного уровня дискриминации (ограничения). Отчетливо коррелирует с суммарным количеством генерируемых в единицу времени газовых пузырьков.

В качестве дополнительных параметров АЭ (также дающих информацию о размерах газовых пузырьков) использовали следующие.

Энергия электрического сигнала АЭ E_c [Дж] — измеренная площадь под огибающей электрического сигнала АЭ. Диапазон изменения $10^{-9} \dots 10^{-5}$ Дж. Отчетливо коррелирует с размером газовых пузырьков.

Выбросы АЭ [имп.] — количество осцилляций, превышающих установленный уровень дискриминации в период нахождения огибающей электрического импульса АЭ над порогом ограничения. Отчетливо коррелирует с количеством генерируемых в единицу времени газовых пузырьков.

Анализ полученных результатов. Рассмотрим некоторые полученные данные типичных акустограмм каталитического процесса разложения пероксида водорода (рис. 1).

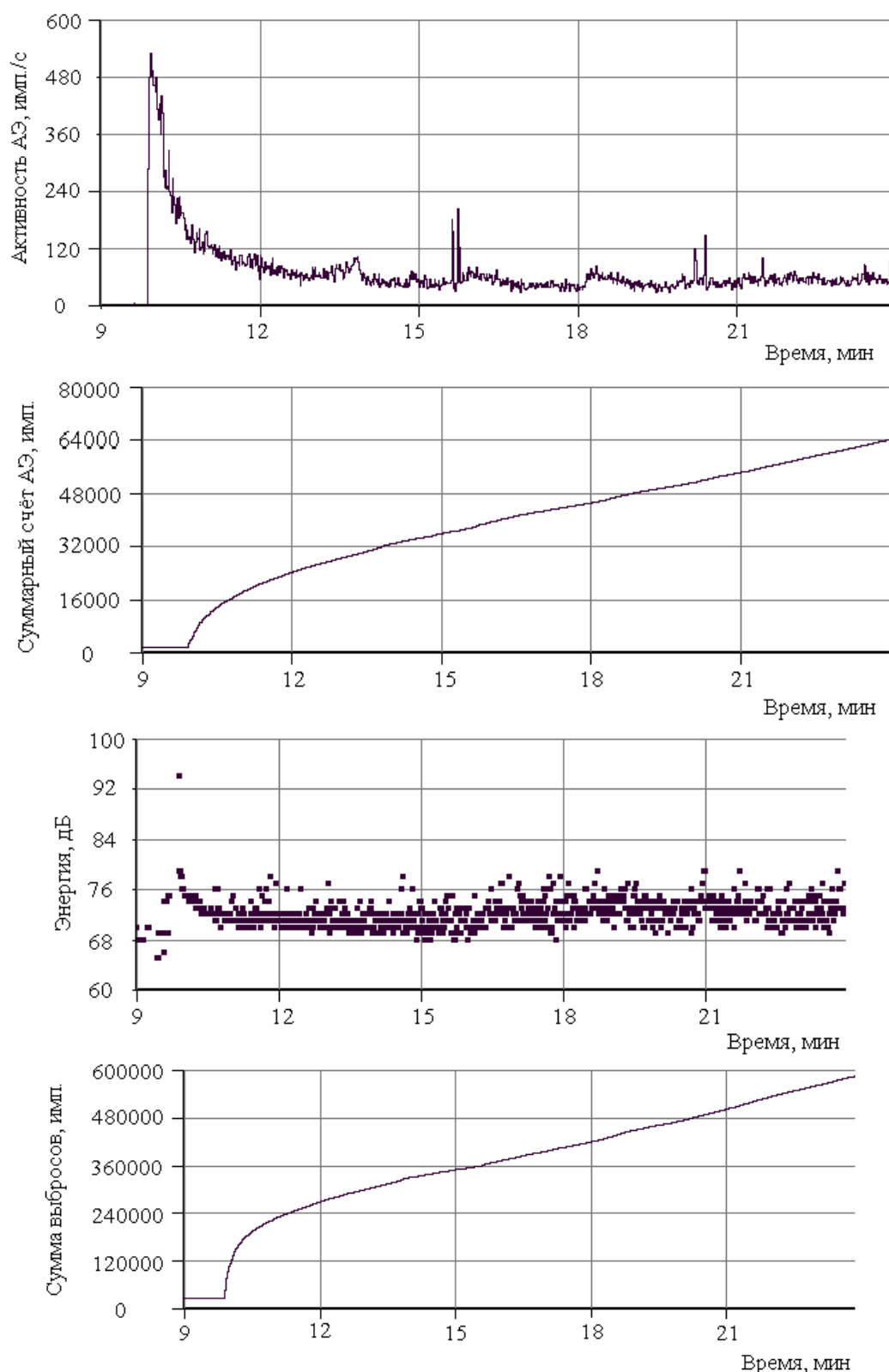


Рис. 1. Экспериментальные данные по изменению некоторых параметров АЭ при разложении пероксида водорода (катализатор — серебро)

Из представленных данных видно, что после некоторого переходного периода (в среднем 5–15 минут) процесс образования газовых пузырьков стабилизируется и суммарное число импульсов равномерно увеличивается. Причем это явление наблюдается в каждом проведенном эксперименте. В то же время от эксперимента к эксперименту увеличивается скорость повышения суммарного счета (рис. 2).

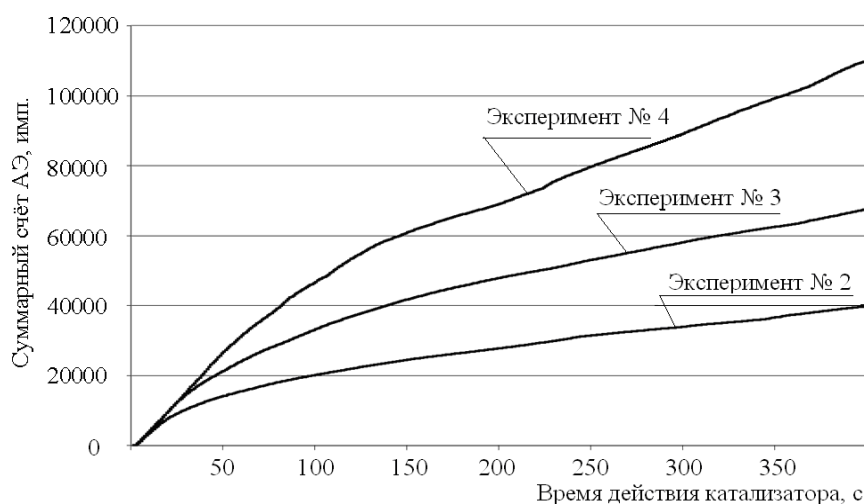


Рис. 2. Динамика изменения суммарного счета импульсов АЭ ряда проведенных экспериментов

Это, в свою очередь, свидетельствует об увеличении активности катализатора, объясняемом следующим образом. Известно, что скорость гетерогенного катализа лимитируется реакцией между адсорбированными молекулами. В то же время преимущественная адсорбция на поверхности катализаторов происходит на тех атомах, которые расположены на пиках, трещинах и в других местах нарушения кристаллической однородности поверхности. Поскольку используется один и тот же образец катализатора, рост активности может быть обусловлен только изменением структуры катализатора (что наблюдается визуально) и постепенным увеличением его поверхности в результате образования промежуточных соединений. В итоге компактный образец катализатора постепенно превращается в порошок (табл. 1).

Таблица 1

Изменение суммы импульсов АЭ по экспериментам

№ эксперимента	Сумма импульсов АЭ N_{Σ} , имп.	
	0–4 мин	4–8 мин
1	7960	3490
2	31132	12028
3	52476	23585
4	78420	50708

Увеличение активности катализатора приводит к увеличению активности импульсов АЭ. Причем это наблюдается как в отношении среднего значения $N_{\text{сред.}}$, так и $N_{\text{макс}}$ и $N_{\text{мин}}$ (табл. 2).

Таблица 2

Изменение активности импульсов АЭ по экспериментам

№ эксперимента	Активность АЭ N , имп./с (4–8 мин.), значение		
	Максимальное ($N_{\text{макс.}}$)	Минимальное ($N_{\text{мин.}}$)	Среднее ($N_{\text{сред.}}$)
1	43	5	14,54
2	205	30	50,11
3	137	63	98,27
4	250	144	201,45

Следует указать, что активность АЭ может расти и в случае образования более крупных по размеру газовых пузырьков. При этом должно наблюдаться и увеличение энергии АЭ, поскольку энергия единичного схлопывания также возрастает. Однако мы не наблюдали существенного изменения энергии АЭ (на рис. 3 видно, что энергия АЭ меняется в узком диапазоне 70–76 дБ), следовательно, размеры образующихся газовых пузырьков остаются постоянными в ходе всего каталитического процесса разложения пероксида водорода.

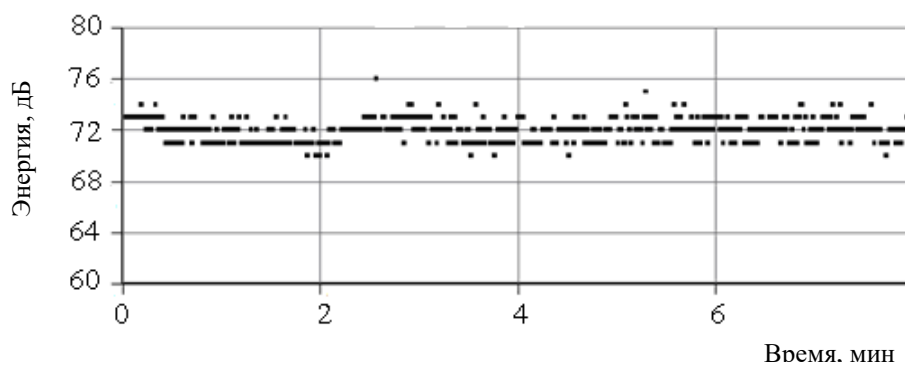


Рис. 3. Экспериментальные данные по наблюдению за изменением энергии сигналов АЭ

Визуальное наблюдение также подтверждает факт: в ходе процесса размеры образующихся газовых пузырьков остаются примерно постоянными.

Таким образом, параметры АЭ свидетельствуют об увеличении количества газовых пузырьков, а не их размера, следовательно, можно говорить об интенсификации образования кислорода за счет увеличения поверхности контакта катализатора и пероксида водорода. Этот процесс не может продолжаться бесконечно, поскольку количество используемого катализатора (10 мг Ag) неизменно. Рост поверхности катализатора имеет какое-то насыщение. И при проведении 4–5-го эксперимента разложения пероксида водорода с использованием одного и того же образца катализатора мы достигаем этого насыщения. При дальнейшем использовании этого катализатора не наблюдается изменения кривой наклона суммарного числа импульсов. Постоянство кривой наклона суммы импульсов свидетельствует помимо прочего о сходимости и воспроизводимости метода АЭ для изучения гетерогенных химических процессов в жидкости.

Поскольку реакция каталитического разложения пероксида водорода характеризуется ярко выраженным переходным процессом на начальном этапе, основной акцент при изучении метрологических аспектов данной реакции сделан на том временном отрезке, когда наблюдался установившийся процесс. Продолжительность переходного процесса, оцениваемого по параметрам «количество осцилляций», «время нарастания акустического сигнала» и «длительность акустического сигнала», составляет, как было указано выше, 5–15 мин.

С течением времени концентрация пероксида водорода будет постепенно снижаться, однако, если рассматривать относительно небольшой интервал времени (порядка 40–100 мин), концентрацию условно можно принять постоянной. Рассмотрим в этом случае, как варьируются параметры титрования при использовании перманганатометрического способа определения концентрации пероксида водорода. В этот же период активность сигналов АЭ менялась следующим образом (табл. 3). В качестве меры рассеяния экспериментальных результатов обычно используется среднее квадратическое (стандартное отклонение или квадрат этого значения — величина дисперсии [12].

Таблица 3

Сравнение данных перманганатометрического метода и метода акустической эмиссии

Параметры	Концентрация H_2O_2 согласно перманганатометрическому методу, %	Активность АЭ, имп./с
Диапазон регистрируемых значений	4,672–5,885	398–516
Минимальное значение	4,672	398
Максимальное значение	5,885	516
Стандартное отклонение	0,3219	26,44012
% величины стандартного отклонения к среднему значению	6,1	5,89

При рассмотрении разброса полученных экспериментальных значений мы видим, что дисперсия показателей объема раствора марганцевокислого калия, затраченного на титрование, составляет до 5–6 % от измеренной величины. Такие же данные наблюдаются и по активности сигналов АЭ. Активность АЭ обусловлена выделением газообразного кислорода с поверхности катализатора, схлопыванием и образованием газовых пузырьков и, как следствие, индуцированием волн напряжения в жидкости. В описанном выше случае, а также в случаях выделения растворенных газов из жидкости образование акустических сигналов обусловлено не только разрушением газовых пузырьков на поверхности жидкости. Источником акустических колебаний в жидкости является любое колеблющееся тело (пузырек), выведенное из устойчивого состояния какой-либо внешней силой. Движение пузырьков газа к поверхности вовлекает в колебательный процесс частицы жидкости, которые смещаются относительно своего положения равновесия, пере-

ходя в состояние периодического уплотнения и разряжения. В силу упругости среды этот процесс в виде волны последовательно распространяется на смежные частицы. Малый размер пузырьков, а также наличие жесткой физической связи между длиной волны и размером источника колебаний обуславливают следующий факт. Движение пузырьков также приводит к генерации ультразвуковых волн, регистрируемых пьезодатчиком. Высокая активность АЭ (до 50–100 имп./с) связана с массовым образованием газовых пузырьков при установившемся режиме (после 40 мин. от начала эксперимента). Это наблюдается визуально, причем ничтожное изменение концентрации пероксида водорода за интервал времени, равный 1 секунде. В то же время количество регистрируемых за этот же интервал импульсов АЭ (до 50–100 имп./с) свидетельствует о высокой потенциальной чувствительности метода АЭ.

Выводы. Предлагаемый метод мониторинга процесса каталитической очистки сточных вод по параметрам акустической эмиссии демонстрирует высокую информативность и чувствительность. При этом выявляется сравнительно незначительная случайная погрешность в рамках одного эксперимента. Установлено, что дисперсия значений активности АЭ составляет один порядок величин с используемым традиционным перманганатометрическим методом и достигает 5–6 % от измеренной величины. В дальнейшем необходимо выявить систематические методические погрешности при акустическом мониторинге гетерогенных химических реакций, проводимых даже в рамках одной лаборатории с применением одних и тех же инструментальных средств, а также обеспечить воспроизводимость предлагаемого метода для его использования в количественном химическом анализе.

Библиографический список

1. Каталитический распад пероксида водорода в присутствии оксо-пероксо соединений молибдена / Р. А. Смолин [и др.] // Вестник Казан. технологич. ун-та. — 2011. — № 15. — С. 57–61.
 2. Centi, G. Catalytic wet oxidation with H₂O₂ of carboxylic acids on homogeneous and heterogeneous Fenton-type catalysts / G. Centi, S. Perathoner, T. Torre // *Catalysis Today*. — 2000. — Vol. 55, iss. 1/2. — P. 61–69.
 3. Шамб, У. Перекись водорода / У. Шамб, Ч. Сеттерфилд, Р. Вентворс ; под ред. А. И. Горбанева. — Москва : Изд-во иностранной литературы, 1958. — 580 с.
 4. Builo, S. I. Acoustic Emission Testing and Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid Media / S. I. Builo, D. M. Kuznetsov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. — 2010. — Vol. 46, № 9. — P. 686–691.
 5. Гапонов, В. Л. Исследование физико-химических процессов в жидкости акустико-эмиссионным методом / В. Л. Гапонов, Д. М. Кузнецов ; Дон. гос. техн. ун-т. — Ростов-на-Дону, 2011. — 88 с. — Деп. в ВИНТИ 24.03.11, № 139-B2011.
 6. Kuznetsov, D. M. Correlation Evaluation of the Acoustic Emission's Method the Tool of Exo Solvation Kinetik's Research / D. M. Kuznetsov, S. I. Builo, J. A. Ibragimova // *Chemical Technology*. — 2011. — Vol. 6, iss. 2. — P. 112–113.
 7. Acoustic-Emission Testing and Diagnostics of the Dissolution Kinetics of Crystalline Component / S. I. Builo [et al.] // *Russian Journal of Nondestructive Testing* // 2012. — Vol. 48, № 10. — P. 53–56.
 8. Builo, S. I. Acoustic Emission Testing of Capillary Liquid Flows in Porous Media / S. I. Builo, D. M. Kuznetsov, V. L. Gaponov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. — 2014. — Vol. 50, № 7. — P. 19–23.
 9. Гапонов, В. Л. Теоретические и экспериментальные исследования процесса импрегнирования гибких пористых материалов в жидкофазной среде / В. Л. Гапонов, Д. М. Кузнецов, В. В. Трепачев ; Дон. гос. техн. ун-т. — Ростов-на-Дону, 2012. — 55 с. — Деп в ВИНТИ 23.3.12, № 134-B2012.
 10. Гапонов, В. Л. Акустическая эмиссия как инструмент изучения кинетики химических реакций в жидкой среде / В. Л. Гапонов, Д. М. Кузнецов ; Дон. гос. техн. ун-т. — Ростов-на-Дону, 2013. — 74 с. — Деп. в ВИНТИ 27.09.13, № 278-B2013.
 11. Builo, S. I. Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media / S. I. Builo, D. M. Kuznetsov, V. L. Gaponov // *Advanced Materials. Studies and Applications* / Ed. I. A. Parinov, Shun-Hsyung Chang, S. Theerakulpisut. — New York : Nova Science Publishers, 2015. — Chapter 13. — P. 193–208.
 12. Дворкин, В. И. Метрология обеспечения качества количественного химического анализа / В. И. Дворкин. — Москва : Химия, 2001. — 263 с.
- Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by okso-perokso molybdenum compounds.

References

1. Smolin, R.A., et al. Kataliticheskiy raspad peroksida vodoroda v prisutstvii okso-perokso soedineniy molibdena. [Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by okso-perokso molybdenum compounds.] *Herald of Kazan Technological University*, 2011, no. 15, pp. 57–61 (in Russian).

2. Centi, G., Perathoner, S., Torre, T. Catalytic wet oxidation with H₂O₂ of carboxylic acids on homogeneous and heterogeneous Fenton-type catalysts. *Catalysis Today*, 2000, vol. 55, iss. 1/2, pp. 61–69.
3. Shamb, U., Setterfield, Ch., Wentvors, R. Pereki's vodoroda. [Hydrogen peroxide.], Gorbanev, A.I., ed. Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury, 1958, 580 p. (in Russian).
4. Builo, S.I., Kuznetsov, D.M. Acoustic Emission Testing and Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid Media. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, no. 9, pp. 686–691.
5. Gaponov, V.L., Kuznetsov, D.M. Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov v zhidkosti akustiko-emissionnym metodom. [Study of physical and chemical processes in liquid by acoustic emission method.] DSTU, Rostov-on-Don, 2011, 88 p. Dep. in VINITI, 24.03.11, no. 139-B2011 (in Russian).
6. Kuznetsov, D.M., Builo, S.I., Ibragimova, J.A. Correlation Evaluation of the Acoustic Emission's Method the Tool of Exo Solvation Kinetik's Research. *Chemical Technology*, 2011, vol. 6, iss. 2, pp. 112–113.
7. Builo, S.I., et al. Acoustic-Emission Testing and Diagnostics of the Dissolution Kinetics of Crystalline Component. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, vol. 48, no. 10, pp. 53–56.
8. Builo, S.I., Kuznetsov, D.M., Gaponov, V.L. Acoustic Emission Testing of Capillary Liquid Flows in Porous Media. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 7, pp. 19–23.
9. Gaponov, V.L., Kuznetsov, D.M., Trepachev, V.V. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya protsessa impregnirovaniya gibkikh poristikh materialov v zhidkofaznoy srede. [Theoretical and experimental studies of the process of impregnating porous flexible materials in liquid-phase medium.] DSTU, Rostov-on-Don, 2012, 55 p. Dep. in VINITI, 23.3.12, no. 134-B2012 (in Russian).
10. Gaponov, V.L., Kuznetsov, D.M. Akusticheskaya emissiya kak instrument izucheniya kinetiki khimicheskikh reaktsiy v zhidkoy srede. [Acoustic emission as a tool for studying the kinetics of chemical reactions in liquid medium.] DSTU, Rostov-on-Don, 2013, 74 p. Dep. in VINITI 27.09.13, no. 278-B2013 (in Russian).
11. Builo, S.I., Kuznetsov, D.M., Gaponov, V.L. Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media. *Advanced Materials. Studies and Applications*. Parinov, I.A., Shun-Hsyung Chang, Theerakulpisut, S., eds. New York: Nova Science Publishers, 2015, Chapter 13, pp. 193–208.
12. Dvorkin, V.I. Metrologiya obespecheniya kachestva kolichestvennogo khimicheskogo analiza. [Metrology of quality assurance of quantitative chemical analysis.] Moscow: Khimiya, 2001, 263 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 13.10.2015

Сдана в редакцию 13.10.2015

Запланирована в номер 23.03.2016

Сведения об авторах

Алферов, Александр Сергеевич,
alfa-8303@yandex.ru

Антибас, Имад Ризакалла,
imad.antypas@mail.ru

Арзуманян, Роман Вадимович,
Roman.arzum@gmail.com

Белов, Сергей Владимирович,
ButovchenkoAV@yandex.ru

Брагинец, Сергей Валерьевич,
sbraginets@mail.ru

Важенин, Владислав Алексеевич,
vladislav251990@gmail.com

Вернигоров, Юрий Михайлович,
jvernigorov@dstu.edu.ru

Гайдаш, Марина Викторовна,
gaydash-m@mail.ru

Гапонов, Владимир Лаврентьевич,
v.gaponov6591@yandex.ru

Губанова, Александра Анатольевна,
anatoliya81@mail.ru

Гучева, Наталья Владимировна,
ngucheva@gmail.com

Дорошенко, Артем Александрович,
Sad133@yandex.ru

Дорошенко, Артем Александрович,
Sad133@yandex.ru

Евельсон, Лев Игоревич,
levelmoscow@mail.ru

Ермолев, Юрий Иванович,
Ermolevui@yandex.ru

Ершов, Игорь Владимирович,
thijd@mail.ru

Жаров, Виктор Павлович,
zharovvp@mail.ru

Жданова, Татьяна Павловна,
zhdanovatp@gmail.com

Заковоротный, Вилор Лаврентьевич,
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Зыкин, Сергей Владимирович,
szykin@mail.ru

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт
механизации и электрификации сельского хозяйства,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Институт компьютерных технологий и
информационной безопасности Южного
федерального университета, Российская Федерация
ООО «Донская гофротара», Российская Федерация

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт
механизации и электрификации сельского хозяйства,
Российская Федерация
Ростовский государственный университет путей
связи, Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Северо-Кавказский научно-исследовательский
институт механизации и электрификации сельского
хозяйства, Российская Федерация
Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Брянский государственный инженерно-
технологический университет, Российская Федерация
Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация

Институт математики им. С. Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Российская Федерация

Изюмов, Андрей Игоревич, Andrei-Igorevich1991@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Илясов, Виктор Васильевич, viily@mail.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Карнаухов, Николай Федорович, nika811@bk.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Кем, Александр Юрьевич, akem@donstu.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Кипнис, Иосиф Аншелевич, ikipnis@yandex.ru	ООО «Научно – производственная фирма «КАСИОР»», Российская Федерация
Кобак, Валерий Григорьевич, valera33305@mail.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Коледов, Леонид Викторович, leonidvkoledov@mail.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Крахт, Людмила Николаевна, lkrakht@mail.ru	Старооскольский технологический институт научно- исследовательский технологический университет "МИСиС", Российская Федерация
Кузнецов, Дмитрий Михайлович, kuznetsovdmi@mail.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Лимаренко, Николай Владимирович, nikolajj-limarenko@rambler.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Лукьянов, Александр Дмитриевич, lex1998@rambler.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Лыков, Антон Сергеевич, antonlykov.anton@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Мандровский, Константин Петрович, mandrovskiikp@mail.ru	Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация
Меркер, Эдуард Эдгарович, merker@inbox.ru	Старооскольский технологический институт научно- исследовательский технологический университет "МИСиС", Российская Федерация
Мосин, Сергей Владимирович, svmosin@gmail.com	Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация
Никифоров, Игорь Яковлевич,	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Памфилов, Евгений Анатольевич, pamfilov@bgita.ru	Брянский государственный инженерно- технологический университет, Россия
Панов, Юрий Викторович, u-panov@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Пахомов, Виктор Иванович, vnipitim@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Подуст, Сергей Фёдорович, PodustSS@nevz.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Полуянов, Андрей Николаевич, andrey.poluyanov@gmail.com	Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация

Рудова, Ирма Шалвовна, irmuse4ka@rambler.ru	Донской государственный технический университет Российская Федерация
Соловьев, Аркадий Николаевич, solovievarc@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Статовой, Дмитрий Александрович, dr-monro@mail.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Степанов, Виктор Александрович, Viktor1990_31@mail.ru	Старооскольский технологический институт научно-исследовательский технологический университет, Российская Федерация
Степанова, Юлия Витальевна, julija_stepanova@ro.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Сухинов, Александр Иванович, sukhinov@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Терехов, Дмитрий Юрьевич, terekhov.d.iu@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Тугенгольд, Андрей Кириллович, akt0@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Тупольских, Татьяна Ильинична, tupolskix@mail.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Филимонов, Максим Николаевич, maxfil2006@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Харманда, Мухамад Гиас, mgk@scs-net.org	Department of Biomedical Engineering Lund University / LTH, Sweden
Харламов, Денис Александрович,	Старооскольский технологический институт научно-исследовательский технологический университет, Российская Федерация
Хозяев, Игорь Алексеевич, dmitriyrudo@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Цыганков, Александр Григорьевич,	Брянский государственный инженерно-технологический университет, Российская Федерация
Шаповал, Борис Григорьевич, nba-shapoval@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Шевцов, Михаил Юрьевич, mesouug@gmail.com	Донской государственный технический университет, Российская Федерация
Ширяева, Людмила Игоревна, golf3_007@mail.ru	Брянский государственный инженерно-технологический университет, Российская Федерация

Index

Alferov, Alexander S.

alfa-8303@yandex.ru

Antypas, Imad Rezakalla

Imad.antypas@mail.ru

Arzumanyan, Roman V.

Roman.arzum@gmail.com

Belov, Sergey V.

ButovchenkoAV@yandex.ru

Braginets, Sergey V.

sbraginets@mail.ru

Doroshenko Artem A.

Sad133@yandex.ru

Evelson, Lev I.

levelmoscow@mail.ru

Filimonov, Maxim N.

maxfil2006@yandex.ru

Gaponov, Vladimir L.

v.gaponov6591@yandex.ru

Gaydash, Marina V.

gaydash-m@mail.ru

Gubanova, Alexandra A.

anatoliya81@mail.ru

Gucheva, Natalya V.

ngucheva@gmail.com.

Ilyasov, Victor V.

viily@mail.ru

Izyumov, Andrey I.

Andrei-Igorevich1991@yandex.ru

Karnaukhov, Nikolay F.

nika811@bk.ru

Kem, Alexander Y.

akem@donstu.ru

Kharlamov, Denis A.**Kharmanda, Ghias Mohamed**

mgk@scs-net.org

Khozyaev, Igor A.

dmitriyrudo@gmail.com

Kipnis, Iosif A.

ikipnis@yandex.ru

Kobak, Valery G.

valera33305@mail.ru

North Caucasian Research Institute of Agricultural
Engineering and Electrification of Agriculture, Russian
Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Institute of Computer Technology and Information Security,
Southern Federal University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

North Caucasian Research Institute of Agricultural
Engineering and Electrification of Agriculture, Russian
Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Bryansk State Technological Engineering University,
Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

North Caucasian Research Institute of Agricultural
Engineering and Electrification of Agriculture, Russian
Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Stary Oskol Technological Institute, Russian Federation
Lund University, Sweden

Don State Technical University, Russian Federation

KASIOR" Research and Production Company, Russian
Federation

Don State Technical University, Russian Federation

Koledov, Leonid V. leonidvkoledov@mail.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Krakht, Lyudmila N. lkrakht@mail.ru	Stary Oskol Technological Institute, Russian Federation
Kuznetsov, Dmitry M. kuznetsovdm@mail.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Limarenko, Nikolay V. nikolajj-limarenko@rambler.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Lukyanov, Alexander D. lex1998@rambler.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Lykov, Anton S. antonlykov.anton@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation
Mandrovskiy, Konstantin P. mandrovskiikp@mail.ru	Moscow Automobile and Road Construction University, Russian Federation
Merker, Eduard E. merker@inbox.ru	Stary Oskol Technological Institute, Russian Federation
Mosin, Sergey V. svmosin@gmail.com	Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
Nikiforov, Igor Y.	Don State Technical University, Russian Federation
Pakhomov, Victor I. vniptim@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation
Pamfilov, Evgeny A. pamfilov@bgita.ru	Bryansk State Technical Engineering University, Russian Federation
Panov, Yury V. u-panov@yandex.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Podust, Sergey F. PodustSS@nevz.com	Don State Technical University, Russian Federation
Poluyanov, Andrey N. andrey.poluyanov@gmail.com	Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
Rudova, Irma S. irmuse4ka@rambler.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Shapoval, Boris G. nba-shapoval@yandex.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Shevtsov, Mikhail Y. mesouug@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation
Shiryaeva, Ludmila I. golf3_007@mail.ru	Bryansk State Technical Engineering University, Russian Federation
Solovyev, Arkady N. solovievarc@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation
Statovoy, Dmitry A. dr-monro@mail.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Stepanov, Victor A. viktor1990_31@mail.ru	Stary Oskol Technological Institute, Russian Federation
Stepanova, Yuliya V. ulija_stepanova@ro.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Sukhinov, Alexander I. sukhinov@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation

Terekhov, Dmitry Y. terekhov.d.iu@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation
Tsygankov, Alexander G.	Bryansk State Technical Engineering University, Russian Federation
Tugengold, Andrey K. akt0@yandex.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Tupolskikh, Tatyana I. tupolskix@mail.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Vazhenin, Vladislav A. vladislav251990@gmail.com	Rostov State Transport University, Russian Federation
Vernigorov, Yury M. jvernigorov@dstu.edu.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Yermolyev, Yury I. Ermolevui@yandex.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Yershov, Igor V. thijd@mail.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Zakovorotny, Vilor L. vzakovorotny@dstu.edu.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Zharov, Victor P. zharovvp@mail.ru	Don State Technical University, Russian Federation
Zhdanova, Tatyana P. zhdanovatp@gmail.com	Don State Technical University, Russian Federation
Zykin, Sergey V. szykin@mail.ru	Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation